目視点検情報に基づく既設 RC 構造物の定量的な劣化予測手法に関する研究

2023 年 3 月

鈴　木　修　一

目　　次

第 1 章　序　　論
1.1　研究の背景と目的 1
1.2　本研究の構成 4

第 2 章　既往の研究
2.1　はじめに 6
2.2　腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係 6
2.2.1　提案式 6
2.2.2　実験データ 12
2.3　空間分布の推定手法 19
2.4　RC 構造物の信頼性評価 22

第 3 章　鉄筋腐食量の推定式
3.1　はじめに 30
3.2　既往の推定式における形状の適合性 30
3.3　推定式の基本形状検討 36
3.3.1　基本形状の改良概要 36
3.3.2　腐食ひび割れ幅発生時の鉄筋腐食量 37
3.3.3　コンクリート強度の推定式への反映 45
3.4　カテゴリーデータを考慮した推定式の検討 48
3.4.1　対象とするカテゴリーデータ 48
3.4.2　カテゴリーデータを考慮した非線形回帰分析 51
3.5　まとめ 55

第 4 章　鉄筋腐食量の空間分布推定
4.1　はじめに 57
4.2　GPR を用いた異種特性値の空間分布推定手法の定式化 57
4.3　本検討で使用する実験データ 61
4.3.1　実験概要 61
4.3.2　測定方法および測定結果 61
4.4　腐食ひび割れ幅に基づく鋼材質量減少率の空間分布推定 72

4.4.1　腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関関係 72
4.4.2　腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相互相関 77
4.4.3　鋼材質量減少率の空間分布推定結果 88
4.4.4　鋼材質量減少率の確率場のパラメータ設定 100
4.5　まとめ 103

第 5 章　腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の現状評価
5.1　はじめに 105
5.2　評価方法 105
5.2.1　信頼性評価手法 105
5.2.2　信頼性評価手法を用いた既設 RC 構造物の現状評価方法 106
5.3　検討モデルおよび検討条件 108
5.3.1　検討モデル 108
5.3.2　検討モデルの安全性に対する設計計算 108
5.3.3　腐食ひび割れ幅の空間分布 112
5.3.4　設計変数の不確定性 115
5.4　現状評価に対する限界状態の定義 116
5.4.1　限界状態の定義 116
5.4.2　鋼材質量減少率および平均物性を用いた場合の安全率 117
5.5　鋼材質量減少率の算定方法 119
5.6　限界状態確率の算定 121
5.7　まとめ 126

第 6 章　結論および今後の方向性
6.1　結論 128
6.2　今後の方向性 130

付録-Ⅰ　腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率との相互相関.......................131
付録-Ⅱ　腐食ひび割れ幅の推定結果 141

謝辞 151

第1章　序　論

1.1　研究の背景と目的

昭和 30 年代の高度経済成長時代より数多くの RC 構造物が建設されてきた．かつて，RC 構造物は半永久的に利用できる構造物のように考えられていた．しかし，建設より 50 年以上経過した既設 RC 構造物を調査してみると，健全な状態を保持しているものがある一方，環境条件によっては経年劣化の進んだものもかなり存在している．

図 1-1 に示す政府の資料[1)]によれば，全国には橋梁（橋長 2m 以上）が約 70 万橋存在し，10 年以内にその半数の橋梁が竣工から 50 年以上経過することになる．全体の 71％の橋梁が市町村道のもので，厳しい財源の中で橋梁の補修・補強あるいは架替えが求められる．今後，橋梁に限らず経年劣化した既設構造物の急激な増加を考えると，既設構造物の劣化状態から補修・補強の優先順位を決め，適切に構造物を維持管理していかなければならない．

RC 構造物の主な経年劣化には，塩害，中性化，凍害，アルカリ骨材反応，化学的浸食および疲労がある．日本は海に囲まれた島国であるため，それらの中でも塩害により著しく経年劣化した RC 構造物が多く見られる．塩害は，コンクリート中への塩化物イオンの侵入により鉄筋が腐食膨張する現象であり，コンクリート表面に腐食ひび割れを生じさせる．図 1-2 に示すように鉄筋腐食と腐食ひび割れにより，RC 構造物の耐荷性能は著しく低下する[2)]．

塩害による RC 構造物の健全性を適切に評価するには，鋼材質量減少率のような鉄筋腐食量についての定量的な情報が得られるのが望ましい．そのためには，コンクリートから鉄筋を露出させ，ノギス等により鉄筋径を計測する必要がある．自然電位法や分極抵抗法のような非破壊検査手法もあるが，それらは鉄筋腐食の有無あるいは鉄筋腐食の程度の把握にとどまる[3)]．最近では，赤外線による方法，超音波・電磁波による方法等の研究・開発が行われているが，今のところ実務での利用には至っていない[4)]．

通常の RC 構造物の点検・調査ではひび割れ調査などの目視点検が行われ，構造物表面の腐食ひび割れの長さ，幅，剥離・剥落の程度，錆汁およびエフロレッセンスの有無等の把握が行われる．そして，構造物の状態を健全度（または劣化度）ランクで分類し，状態の悪いランクに分類された場合には補修・補強が実施される．腐食ひび

割れ幅および長さは，鉄筋腐食と密接な関係にある定量的な観測情報である．それを，一旦，定性的な情報に置き換えて既設構造物の健全度評価に用いるのは有効的な活用方法とは言い難い．

最近，ひび割れ調査の計測技術は飛躍的に進歩し，AI を利用してカメラで撮影した画像を解析して，ひび割れを精度良く自動検出することが可能となった [5)]．これまでのような，近接目視でひび割れをスケッチし，それらをスキャンで取り込み，CAD 上でトレースしてデジタル化するという手間のかかる作業から解放されつつある．それに伴い，今後，膨大なひび割れ調査データが蓄積されていくと予想される．これまで以上に腐食ひび割れ情報の有効活用の必要性を感じる．

ひび割れ調査等の観測情報に基づく健全度ランクによる評価とは別に，劣化モデルを用いて現状評価および将来予測を行う場合がある．塩化物イオンがコンクリート内部に侵入し，鉄筋腐食が開始する時期を推定する．その後は鉄筋の腐食速度と経過年数より鉄筋腐食量を算定し，その鉄筋腐食量で RC 構造物の劣化の程度を評価したり，あるいは算定した鉄筋腐食量より残存耐力を求めて RC 構造物の劣化を評価したりする．その場合，調査によって得られた腐食ひび割れ情報は，腐食速度の変化点として腐食ひび割れ発生時期が用いられる程度である．これは，腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量は密接な関係にあるものの，両者ともばらつきが大きく，両者を関連付けても評価・判定は困難であるという考えが背景にあると思われる．もし，観測情報である腐食ひび割れ幅等より鉄筋腐食量を適切に評価出来れば，腐食ひび割れ幅を現状評価および将来予測の定量的評価に役立てることができる．既設 RC 構造物の維持管理において，腐食ひび割れ情報の有効活用が可能となる．

ISO による構造設計における国際標準の動きとして，1998 年に「ISO2394：構造物の信頼性に関する一般原則」[6)]が刊行された．我が国においても，2002 年に「土木建築にかかる設計の基本」[7)]が策定された．そこでは，構造物の要求性能として安全性，使用性および修復性を考え，要求性能を満たすことの検証方法として信頼性設計の考え方を基礎として限界状態設計を実施すべきであると述べられている．その後，新設の土木構造物では信頼性設計法の導入が議論され，現在，一部の基準類では信頼性設計の考え方が採用されている [8)]．維持管理においても，信頼性手法を用いた既設構造物の現状評価および将来予測の研究が行われているものの，実務では信頼性設計の考え方を用いた事例は見当たらない．

信頼性手法の枠組みで，腐食ひび割れ幅より経年劣化した既設 RC 構造物の安全性評価を行うことによって，腐食ひび割れ幅のばらつきを適切に考慮した定量的な現状評価が可能となると考えた．そこで，今後の既設 RC 構造物の維持管理に微力ながらも貢献すべく，研究を実施することにした．本博士論文は，腐食ひび割れ幅に基づく既設構造物の評価手法の構築に関するこれまでの研究成果を取りまとめたものである．

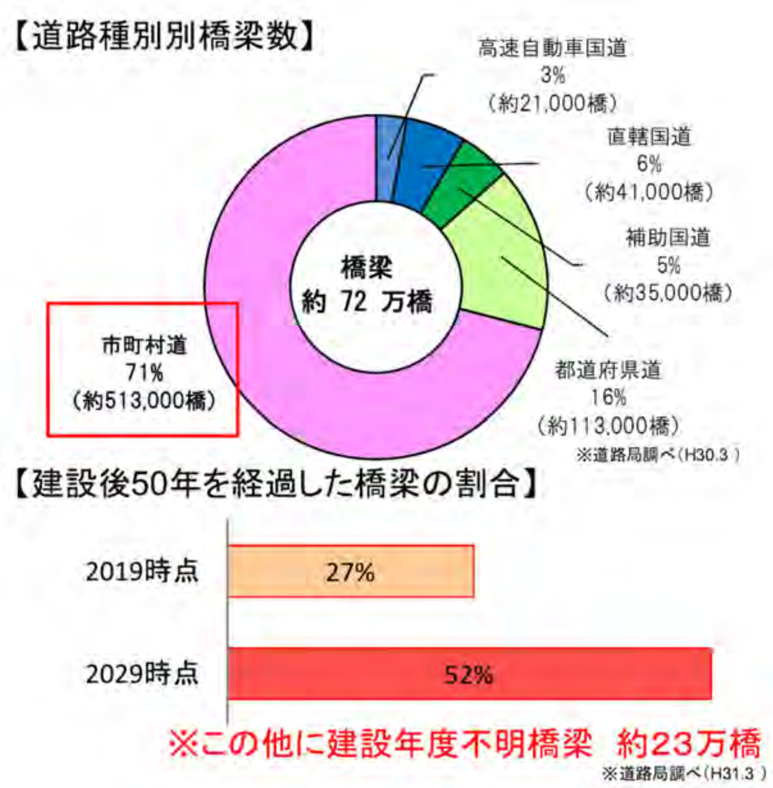


図 1-1 橋梁の老朽化の現状 1)

図 1-2 鉄筋腐食と腐食ひび割れによる劣化 2)

1.2 本研究の構成

図 1-3 に示したように本論文は 6 章で構成している．

第 1 章「序論」では，本研究の背景と目的を述べた．

第 2 章「既往の研究」では，本研究を行うに当たり収集した鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅との関係についての既往の研究について述べる．また，4 章の検討を行う上で参考とした研究および 5 章の検討を行う上で参照した研究について述べる．

第 3 章「鉄筋腐食量の推定式」では，既往の研究を調査して作成した鉄筋腐食実験データベースを用いて鉄筋腐食量の推定式について検討した．まず，基本形状を検討し，それを踏まえて鉄筋種類，せん断補強筋に有無等のカテゴリーデータを考慮できる推定式への拡張を図った．

第 4 章「鉄筋腐食量の空間分布推定」では，確率論的な空間分布推定手法であるガウス過程回帰を用いて，鉄筋腐食実験供試体で得られている腐食ひび割れ幅より鉄筋腐食量の空間分布推定についての適用性を検討した．

第 5 章「腐食ひび割れ幅を用いた既設 RC 構造物の現状評価」では，腐食ひび割れ幅より既設 RC 構造物の限界状態確率を算定する方法を提示するとともに，既設桟橋を対象とした試計算により具体化を図った．

第 6 章「結論および今後の方向性」では，第 3 章から第 5 章で得られた結果を総括する．また，これまでの成果をもとに，今後の検討の方向性について述べる．

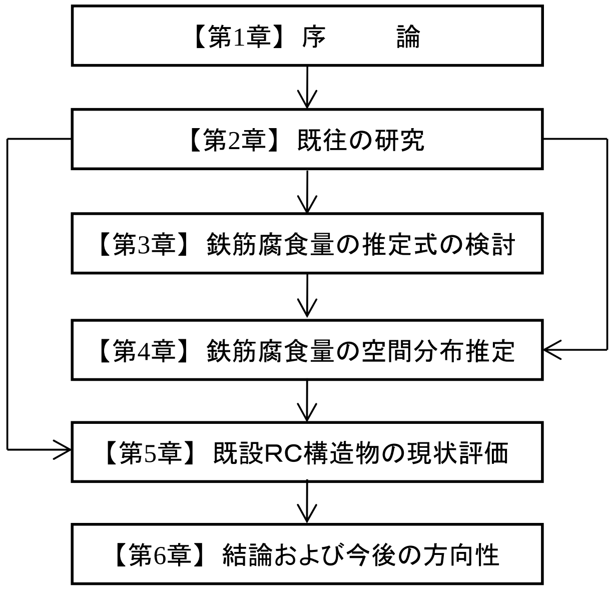


図 1-3 本論文の構成

参考文献（第 1 章）

1) 国土交通省：https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf
2) 国土交通省 道路局：道路橋定期点検要領，2014.
3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘20，2020.
4) 大下英吉，川崎佑磨，高鍋雅則：鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する各種非破壊・微破壊診断手法，非破壊検査，66 巻 3 号，pp.135-140，2017.
5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト紹介冊子（センサシステム技術・イメージング技術・非破壊検査技術），pp.55-58，2019.
6) ISO2394：構造物の信頼性に関する一般原則（General Principles on Reliability for Structures），1998.
7) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.

第2章　既往の研究

2.1　はじめに

信頼性手法の枠組みに,腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式を導入すれば,測定した腐食ひび割れ幅より適切な現状評価あるいは将来予測の定量化を図ることが可能になる．これまでも，いくつかの腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式が提案されている.しかし,それらは研究者が各自で行った実験データに基づくもので,様々な条件には対応していない．そこで，本研究では既往の文献調査を行い，様々な鉄筋腐食実験データを収集し，推定式の検討を行うことにした．2.2 では収集した鉄筋腐食実験について述べる.

既設 RC 構造物の表面に生じた腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定するには，両者を関連付ける推定式に加えて，腐食ひび割れ幅の空間分布に対して鉄筋腐食量の空間分布を推定する必要がある．2.3 では空間分布の推定に関する既往の研究について述べる.

既往の研究においても，信頼性手法を用いて既設 RC 構造物の現状評価および将来予測の検討が行われている．2.4 では，腐食ひび割れ幅から経年劣化した既設 RC 構造物の現状評価を行うに当たり収集した既往の研究について述べる.

2.2　腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係

2.2.1 提案式

腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量に関する研究は 1980 年代中頃より，鉄筋腐食実験に基づいた研究を中心に，多くの研究が行われている[1),2)]．本研究では，既往の文献収集を行い，それらの中から既往の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量に関する提案式について調査した．その結果を以下に示す.

木村らは[3)]，RC 梁供試体を作成し，鉄筋腐食実験として電食実験を行い，鉄筋腐食モデルの幾何学的性質より，ひび割れ角度，鉄筋腐食量，腐食膨張率より腐食ひび割れ幅を推定する式を提案している.

【木村らの提案式（1996）】

$$\delta = (a\Delta\theta + ucos\beta)$$
$$= 2u[cos\beta + a\cdot(cos\alpha + cos\beta/\{h + u\cdot(sin\alpha - sin\beta)\})] \qquad (2.1)$$

ただし，$u = u - u_0$ とする．

ここに，δ：腐食ひび割れ幅
u_0：ひび割れ発生時の腐食変位 (cm)

$$\beta = 45 - \alpha/2 \quad (°)$$
$$u = t_2 - t_1$$

ここに，t_1：腐食によって失われる厚さ (cm)
t_2：腐食による錆の厚さ (cm)

$$t_1 = \emptyset - \frac{\left(\sqrt{\emptyset_2 - 4W_{ca}\cdot\frac{\emptyset}{\rho_s}}\right)}{2}$$

W_{ca}：単位表面積あたりの腐食量
ϕ：鉄筋径 (cm)，ϕ_2：腐食膨張した鉄筋径 (cm)
ρ_s：鉄の密度 (g/cm^3)

$$t_2 = -(\emptyset - 2t_1) + \frac{\left(\sqrt{(\emptyset - 2t_1)2 - 4W_{ca}\cdot\frac{(\emptyset - 2t_1)}{\rho_s}}\right)}{2}$$

ρ：錆の密度 (g/cm^3)，$\rho = \rho_s$/腐食膨張率

岸ら[4)]は，既往の鉄筋腐食実験[1)]に基づいて，腐食ひび割れ幅，かぶり，鉄筋径から鉄筋腐食量を推定する式を提案している．

【岸らの提案式（2001)】

$$y = ax$$
$$a = 0.141exp(1.078d/\phi) \qquad (2.2)$$

ここに　y：鉄筋腐食量 (mg/mm^2)
x：ひび割れ幅 (mm)
d：かぶり (mm)
ϕ：鉄筋径 (mm)

亓らは[5)]，円筒モデルを基本モデルとして，鉄筋腐食によるひび割れ発生時点の鉄筋腐食量および発生後の腐食量とひび割れ幅の関係の基本算定式を誘導した．さらに，ひび割れ発生状況およびひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を把握するために FEM を行

い，かぶり，鉄筋径，コンクリート強度および腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定する式を提案している．

【亓らの提案式（2001）】

$$W_c = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)}\left(\alpha_0\beta_0\frac{0.22\{(2c+d)^2+d^2\}}{E(c+d)}f_c'^{\frac{2}{3}} + \alpha_1\beta_1\frac{(c+d)}{(5c+3d)}w\right) \quad (2.3)$$

ここに，Wc：鉄筋腐食量 (mg/mm^2)

γ：鉄の密度 (7.85mg/mm^2)

ρ：腐食生成物の体積膨張率

c：コンクリートかぶり (mm)

d：鉄筋の直径 (mm)

w：ひび割れ幅 (mm)

E：コンクリートヤング率 (N/mm^2)

f'_c：コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

ひび割れ発生時点の補正係数

α_0：かぶりおよび鉄筋直径に関する補正

=(-0.0005d+0.028)c+(-0.0292d+1.27)

β_0：コンクリート圧縮強度に関する補正

=-0.0055f’c+1.07

ひび割れ発生後の補正係数

α_1：かぶりおよび鉄筋直径に関する補正

=(0.0007d+0.04)c+(0.0663d+5.92)

β_1：コンクリート圧縮強度に関する補正

=-0.0016f’c+1.04

岡崎ら[6)]は，コンクリート梁供試体を作成し，鉄筋腐食実験を行い，腐食ひび割れ幅の非一様性についての検討を行うとともに，二種類の剛体モデルを考え鉄筋腐食量から腐食ひび割れ幅を推定する式を提案している．

【岡崎らの提案式（2003）】

平行移動モデル

$$\Delta w = 2\Delta u = \phi_0 \cdot \varepsilon_s \quad (2.4)$$

回転モデル

$$\Delta w = 2\Delta u + \frac{\frac{2(c+\phi_0)\Delta u}{\phi_0}}{2} = (2c+3\phi_0)\cdot\varepsilon_s \quad (2.4')$$

ここに，Δw：ひび割れ幅の増加量 (mm)
Δu：腐食膨張による鉄筋の半径の増加量 (mm)
ϕ_0：腐食前鉄筋径 (mm)
c：コンクリートかぶり (mm)
ε_s：腐食による鉄筋の面内膨張ひずみ（=鉄筋径の増加率）

荒木らは[7]，コンクリート中の円柱空洞に設置した弾性体を圧縮変形させ，そのポアソン効果によって内圧を発生させる装置を用いて，鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅の関係を模擬した実験を実施した．そして，円柱空洞の半径変化量を腐食減量に換算した換算腐減量とかぶり表面のひずみをひび割れ幅に換算した換算ひび割れ幅より，ひび割れ幅より鉄筋腐食量を推定する式を提案している．

【荒木らの提案式（2006）】

$$W_{loss}(C) = (2.98C + 13.2)exp\{w(0.007C^2 - 0.493C + 11.2)\} \qquad (2.5)$$

ここに，$W_{loss}(C)$：換算腐食減量 (mg/cm^2)
w：換算ひび割れ幅 (mm)
C：かぶり (mm)

道正らは[8]，塩害と中性化を劣化対象として，スラブ供試体を用いた鉄筋腐食実験を行い，腐食ひび割れ幅，鉄筋径およびかぶり厚さより，鉄筋腐食量の予測式を提案している．

【道正らの提案式（2014）】

$$\Delta Q = Q_0 + a \cdot w / c \qquad (2.6)$$

ここに，ΔQ：現在の鉄筋腐食量 (mg/cm^2)
C：かぶり厚さ (mm)
w：ひび割れ幅 (mm)
Q_0：ひび割れ発生時の鉄筋腐食量
中性化による腐食の場合：Q_0=15mg/cm^2
塩害による腐食の場合：Q_0=20mg/cm^2
a：鉄筋径によって決まる定数
D13 の場合は 6900，D16 の場合は 6000

橘高ら[9]は，鉄筋コンクリートを模した鉄筋を埋め込んだモルタル小型試験体について鉄筋腐食促進試験を行い，鉄筋腐食の進行程度を X 線デジタル画像より把握し，

コンクリート表面のひび割れ幅との関係を検討した．そして，鉄筋腐食量，試験体の圧縮強度，かぶり厚さ，鉄筋径より腐食ひび割れ幅を推定する式を提案している．

【橘高らの提案式（2016）】

$$P = 0.1 \times D/D_u$$

$$D_u = -(0.19d + 0.06x + 2.0)ln(F_c) + 0.1d + 4.7 \quad (2.7)$$

ここに，P：腐食ひび割れ幅 (mm)

D：鉄筋の腐食減量 (mg/cm^2)

Du：試験体表面に 0.1mm のひび割れが生じるときの鉄筋腐食減量 (mg/cm^2)

d：鉄筋径 (mm)

x：かぶり厚さ (mm)

Fc：供試体の圧縮強度 (N/mm^2)

篠原らは[10]，コンクリート供試体を作成し，電食実験により鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係について検討している．検討に当たり，鉄筋かぶり，鉄筋径，コンクリート強度を換えた多くの実験を行い，腐食ひび割れ幅とそれらの設計パラメータから鉄筋腐食量を推定する式を提案している．

【篠原らの提案式（2016）】

$$0 \le w_{cr} \le 0.2$$

$$w_{corr} = \alpha_1 \cdot w_{cr} + \beta$$

$$0.2 \le w_{cr} \le 0.6$$

$$w_{corr} = \alpha_2 \cdot (w_{cr} - 0.2) + w_{corr(wcr=0.2)} \quad (2.8)$$

$$\beta = (-0.13 \cdot \sigma_B^2 + 11.5 \cdot \sigma_B - 160) \cdot (e^{0.01c} - 1)$$

$$\alpha_1 = 4300 \cdot e^{(-0.045\sigma_B - 0.035c)}$$

$$\alpha_2 = 1100 \cdot e^{(-0.0022\sigma_B - 0.029c)}$$

ここに，w_{cr}：腐食ひび割れ幅 (mm)

w_{corr}：鉄筋腐食量 (mg/cm^2)

σ_B：コンクリート強度 (N/mm^2)

c：かぶり (mm)

大塚ら[11]は，梁供試体を用いた鉄筋腐食実験を行い，腐食ひび割れ幅から断面減少率を推定する式を提示している．なお，大塚らは鉄筋腐食実験として電食と塩水噴霧を用いている．

【大塚らの推定式（2017）】

$$断面減少率(\%) = A\sqrt{w} \quad (2.9)$$

ここに，A：鉄筋径，コンクリート強度，腐食生成物の体積膨張率(γ)などで決定する係数
(電食の場合 A=18.74，塩水噴霧の場合 A=14.24)
w：腐食ひび割れ幅 (mm)

以上のように，これまでも様々な腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量とを関連付ける式が提案されている．表 2-1 に，腐食ひび割れ幅－鉄筋腐食量に関する既往の提案式一覧表を示す．既往の提案式には，目的変数を腐食ひび割れ幅とした場合と鉄筋腐食量とした場合の 2 つのアプローチがあった．多くの提案式では，腐食ひび割れ幅あるいは鉄筋腐食量の他に，説明変数としてかぶりが用いられていた．それ以外の説明変数として，鉄筋径およびコンクリート強度を用いていた．鉄筋腐食量から腐食ひび割れ幅を予測する場合には，いくつかの提案式で腐食膨張率が用いられていた．

既往の提案式は，いずれも各自が実施した鉄筋腐食実験等に基づいた研究成果であり，多数の研究データを集めて腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係およびそのばらつきについて検討した研究は見当たらない．

表 2-1 腐食ひび割れ幅－鉄筋腐食量に関する既往の提案式一覧

既往の提案式	目的変数	説明変数					
		腐食ひび割れ幅	鉄筋腐食量	鉄筋径	かぶり	コンクリート強度	腐食膨張率
木村ら（1996）	腐食ひび割れ幅		○	○	○		○
岸ら（2001）	鉄筋腐食量	○		○	○		
亓ら（2001）	鉄筋腐食量	○		○	○	○	○
岡崎ら（2003）	腐食ひび割れ幅		○	○	○		○
荒木ら（2006）	鉄筋腐食量	△※1			○		
道正ら（2014）	鉄筋腐食量	○			○		
橘高ら（2016）	腐食ひび割れ幅		○	○	○	○	
篠原ら（2016）	鉄筋腐食量	○			○	○	
大塚ら（2017）	鉄筋腐食量	○		△※2		△※2	△※2

※1:換算ひび割れ幅
※2:係数Aに関連する説明変数

2.2.2 実験データ

腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係に着目した文献を収集した．そのうち鉄筋腐食実験等を実施し，腐食ひび割れと鉄筋腐食量の関係が図表等で明確に示されている論文を調査した[1),2), 6)～29)]．そして 26 編の文献より実験条件，腐食ひび割れ幅－鉄筋腐食量関係のデータを取得し，鉄筋腐食実験データベースを作成した．26 編の文献より収集した 296 供試体に対して，表 2-2 に示す項目について整理した．

腐食ひび割れ幅，鉄筋腐食量の計測データは，最大値を記載した文献，平均値を記載した文献,最大値と平均値の両方を併記した文献など様々であった.鉄筋腐食量は,鋼材質量減少量で記載した文献と鋼材質量減少率で記載した文献があった．また，計測方法には，2 種類の方法があり，一つは鉄筋腐食させた供試体の腐食ひび割れを計測した後，鉄筋をコンクリートから取り出して鉄筋腐食量を計測する方法である．この場合には 1 つの供試体に対する計測回数は 1 回である．もう一つの方法は，電食実験に限られるが，腐食ひび割れ幅を経時的に計測しておいて，鉄筋腐食量は腐食ひび割れ幅計測時の積算電流量から推定する方法である．一つの供試体から複数回の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を計測することができる．中にはπ型変位計等を用いて連続的に腐食ひび割れ幅を計測した実験もあった．それらの文献には両者の関係が曲線として図示されているものの，デジタルデータは示されていない．そこで，鉄筋腐食実験データベースに取り込む際には，経時的な変化が分かるように曲線上の値をデジタイズしてデータの収集を図った．

(1) 実験値

図 2-1 に鉄筋腐食実験で生じた腐食ひび割れ幅の頻度分布を示す．左側の図は腐食ひび割れ幅[平均]の頻度分布，右側の図は腐食ひび割れ幅[最大]の頻度分布である．腐食ひび割れ幅[平均]の多くは 2mm 以下に分布するが，一部，2mm を超えるデータも存在していた．腐食ひび割れ幅[最大]は 4mm 以下の範囲に分布していた．表 2-2 に示すように腐食ひび割れ幅[平均]のデータ数は腐食ひび割れ幅[最大]のデータ数の約 2.5 倍であり，腐食ひび割れ幅[平均]に着目した研究が多い傾向が見られる．

図 2-2 に鉄筋腐食実験で生じた鉄筋腐食量の頻度分布を示す．鉄筋腐食量は，文献によって用いる指標として鋼材質量減少量と鋼材質量減少率が混在していたが，鉄筋腐食量を鋼材質量減少率に統一して整理した結果である．左側の図は鋼材質量減少率[平均]の頻度分布，右側の図は鋼材質量減少率[最大]の頻度分布である．鋼材質量減少率[平均]は 30%以下の範囲に分布していた．鋼材質量減少率[最大]は 30%以上にも分布し，ほぼ 100%のデータも存在していた．表 2-2 に示すように鋼材質量減少率[平均]

のデータ数は鋼材質量減少率[最大]のデータ数のおよそ 7 倍であり，鋼材質量減少率[平均]に着目した研究が多い傾向が見られる．

(2) 腐食条件

鉄筋の腐食方法は，電食，乾湿繰り返し，暴露，塩水噴霧，中性化促進および内圧挿入が用いられていた．表 2-2 に示すように，既往の研究では電食による方法が多く用いられていた．なお，内圧挿入は，コンクリート中に鉄筋を模擬した空洞を作り，空洞内から圧力をかけて，腐食鉄筋の挙動を模擬する実験である．鉄筋腐食量には，圧力により生じた空洞半径の変化量を，鉄筋の腐食膨張率と断面の幾何学的な関係より換算した値を用いている．実際には鉄筋を腐食させていないが，データベースでは内圧挿入を腐食方法とみなした．

(3) コンクリート条件

コンクリート条件のうちコンクリートの種類は，普通コンクリート，早強コンクリート，モルタルの 3 種類であったが，記載のない文献が多く，特定できたのは 110 供試体であった．おそらく，記載のないデータは普通コンクリートだと思われるが，不明とした．水セメント比およびコンクリート強度の情報は収集した供試体データの半数程度で得ることができたが，設計強度および粗骨材寸法の情報は収集した供試体データの 3 割程度であった．コンクリート条件のうち，水セメント比，コンクリート強度，設計強度および粗骨材寸法の頻度分布を図 2-3 に示す．

(4) 供試体条件

供試体条件は，供試体の形状，寸法および純かぶりについてデータ収集を行った．供試体の形状には直方体と円柱の 2 種類があり，そのうちの多くは直方体であった．供試体長（または供試体高さ）は 10cm 程度の短いものから 2.0m 程度の梁供試体まで様々である．純かぶりは 10 から 70mm の範囲で分布していた．供試体条件のうち純かぶりの頻度分布を図 2-4 に示す．

(5) 鉄筋条件

鉄筋条件では，供試体に用いた鉄筋種類，鉄筋径，せん断補強筋の有無および鉄筋配置についてデータ収集した．そのうち鉄筋種類は，異形鉄筋，丸鋼および円柱空洞である．円柱空洞は，上記の内圧挿入実験において鉄筋を模擬したものである．鉄筋配置については，供試体中に鉄筋を 1 本配置して行われた鉄筋腐食実験が全体のおよ

そ 8 割を占めた．数は少ないものの，鉄筋を 2 本または 3 本平行に配置した供試体を用いた実験，鉄筋を交差させた供試体を用いた実験のデータも収集した．鉄筋条件のうち鉄筋径の頻度分布を図 2-4 に示す．

(6) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関性

鉄筋腐食実験データベースに収めたデータを用いて腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関を確認した．腐食ひび割れ幅[平均]と鋼材質量減少率[平均]の相関係数を求めると 0.46 であった．同様にして，腐食ひび割れ幅[最大]と鋼材質量減少率[最大]の相関係数は 0.27 であった．いずれの場合も，相関が高いとは言い難い．腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量は密接な関係にあるものの，算出した相関係数の値は，腐食ひび割れ幅のみでは鋼材質量減少率を推定するのが困難であることを示唆している．

図 2-5 は鉄筋腐食実験データベースのデータを用いて腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係を図化したものである．左側の図は腐食ひび割れ幅[平均]と鋼材質量減少率[平均]の関係，右側の図は腐食ひび割れ幅[最大]と鋼材質量減少率[最大]の関係である．同図では腐食ひび割れ幅が 3.0mm 以下のデータを対象に図化した．

表 2-2 鉄筋腐食実験データベースの概要

項　　目		種　　類	数　　量
実験値	ひび割れ幅	平均	1202　データ
		最大	459　データ
	鉄筋腐食量	平均	1359　データ
		最大	195　データ
	計測頻度	１回	207　供試体
		複数回	89　供試体
腐食条件	腐食方法	電食	265　供試体
		乾湿繰り返し	15　供試体
		暴露	10　供試体
		塩水噴霧	1　供試体
		中性化促進	1　供試体
		内圧挿入	4　供試体
コンクリート条件	コンクリート種類	普通コンクリート	29　供試体
		早強コンクリート	71　供試体
		モルタル	10　供試体
	水セメント比		180　供試体
	コンクリート強度		140　供試体
	設計強度		80　供試体
	粗骨材寸法		98　供試体
供試体条件	部材形状	直方体	221　供試体
		円柱	75　供試体
	寸法		296　供試体
	純かぶり		296　供試体
鉄筋条件	鉄筋種類	異形鉄筋	187　供試体
		丸鋼	105　供試体
		円柱空洞	4　供試体
	鉄筋径		296　供試体
	鉄筋配置	１本	235　供試体
		平行２本	16　供試体
		平行３本	38　供試体
		交差	7　供試体
	せん断補強筋の有無	あり	61　供試体
		あり（一部）	13　供試体
		なし	222　供試体

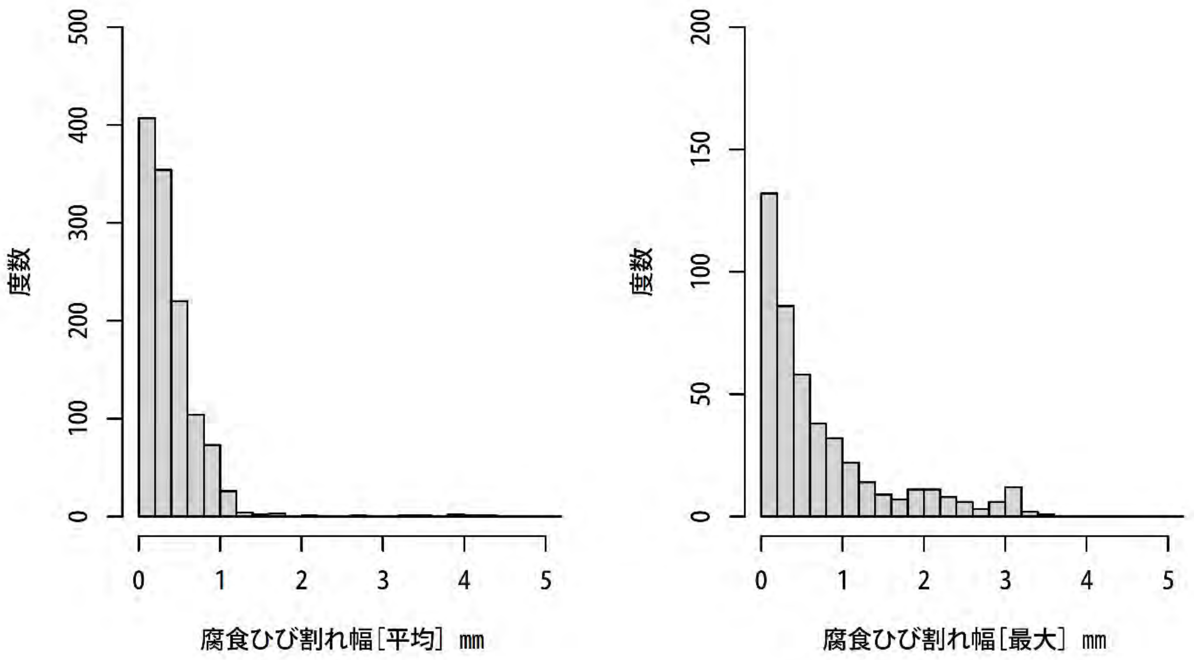


図 2-1 腐食ひび割れ幅の頻度分布

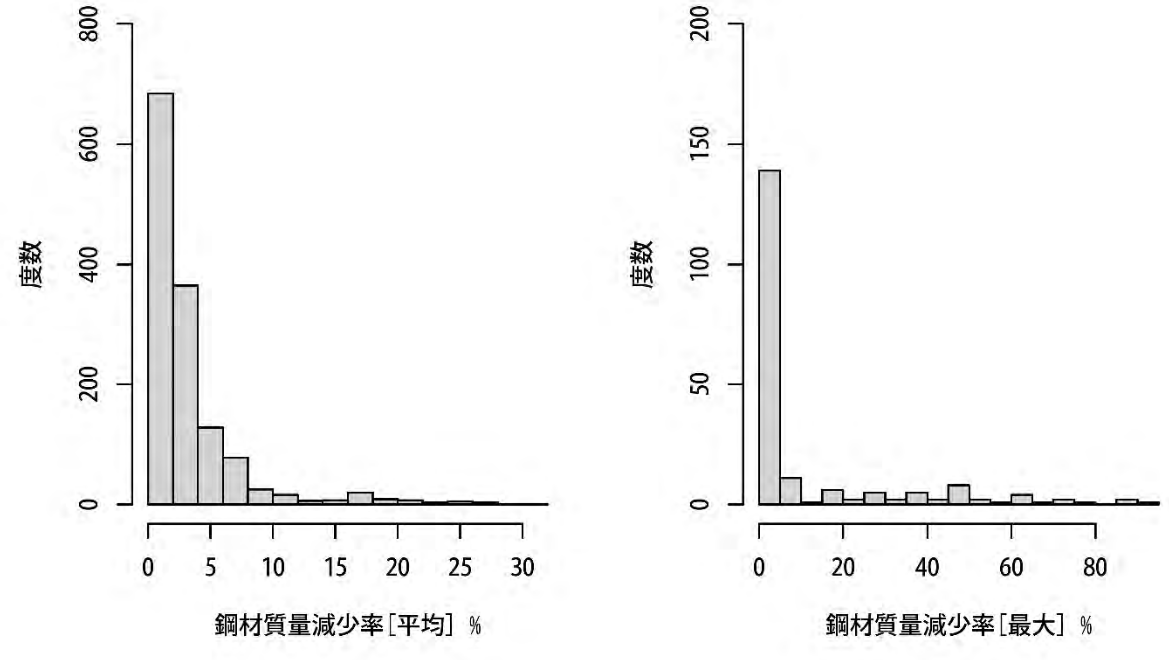


図 2-2 鋼材質量減少率の頻度分布

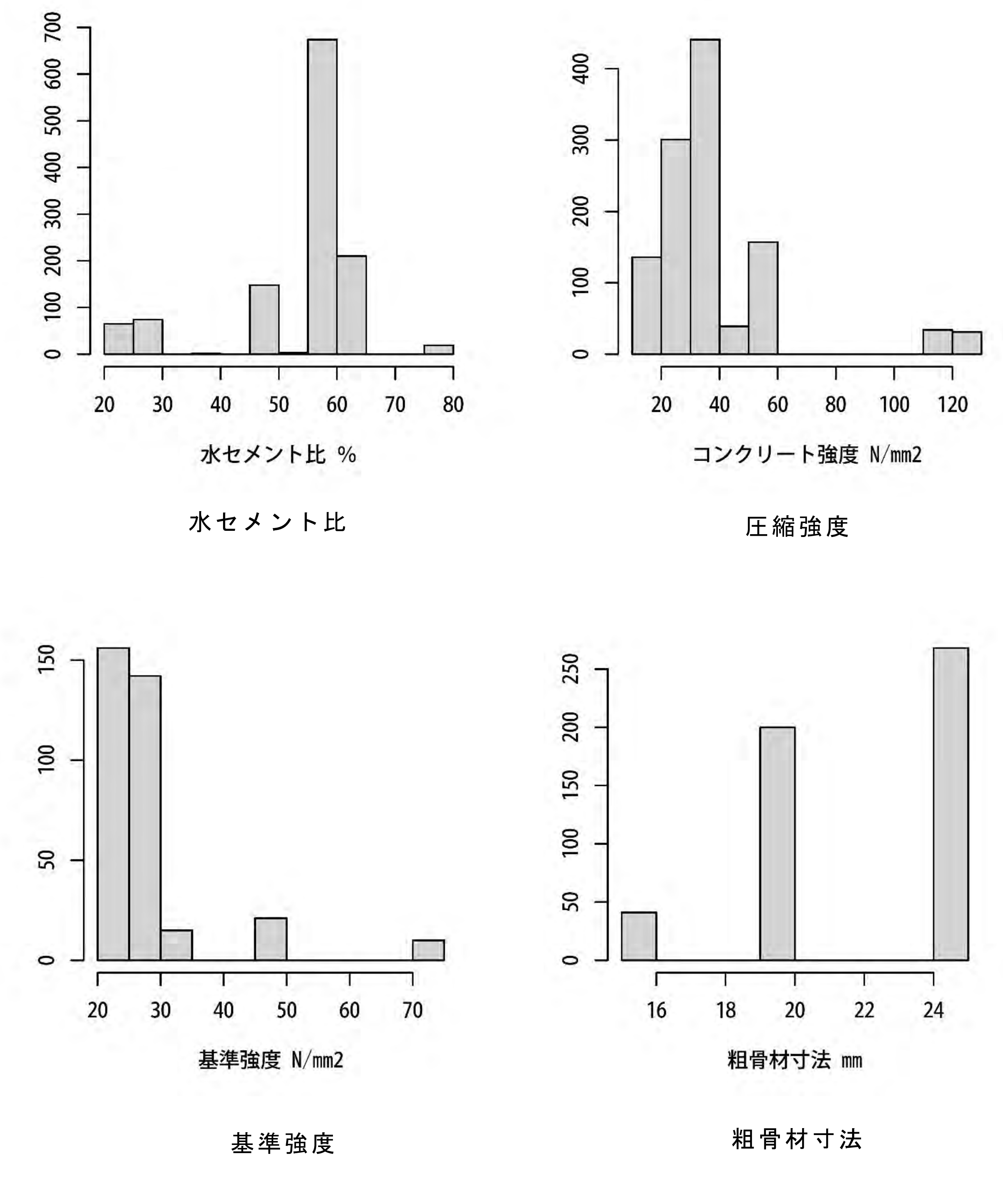
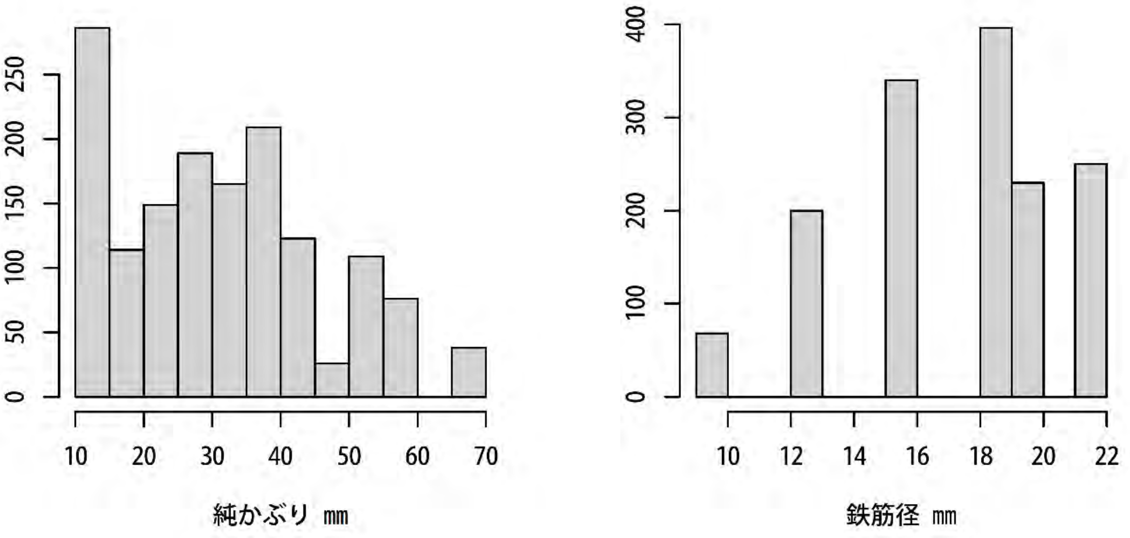
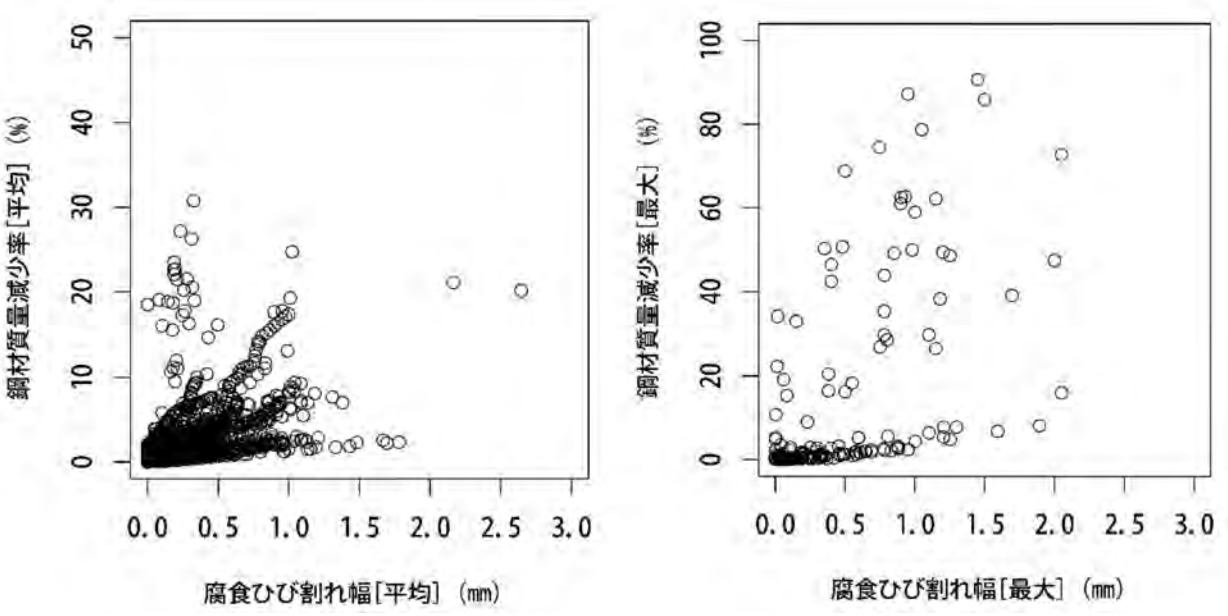


図 2-3 コンクリート条件の頻度分布



純かぶり　　鉄筋径

図 2-4 供試体条件および鉄筋条件の頻度分布



腐食ひび割れ幅[平均]-鋼材質量減少率[平均]　　腐食ひび割れ幅[最大]-鋼材質量減少率[最大]

図 2-5 腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係

2.3 空間分布の推定手法

2.2 では，腐食ひび割れ幅と鋼材腐食量の関係について文献調査を行い，既往の提案式を確認するとともに，鉄筋腐食実験データを収集し鉄筋腐食実験データベースを作成して腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量および実験パラメータの整理・分析を実施した．しかし，これらの知見のみでは，適切に経年劣化した既設 RC 構造物の現状評価を行うことはできない．腐食ひび割れ幅の分布状態からコンクリート内部の鉄筋腐食量の空間的な分布を把握することで，初めて適切な現状評価が可能となる．そこで，これまでに鉄筋腐食に関しての空間分布についての研究，腐食ひび割れ幅の情報から鉄筋腐食量を推定する研究等が行われていないかを調査するとともに，土木分野において検討された空間分布推定に関する文献等を調査した．

2010 年頃より，秋山が中心となり鉄筋腐食のばらつきに関する研究を行い，いくつかの論文を発表している．秋山ら [30)]は，電食により鉄筋を腐食させた RC はり供試体に対して，X 線技術を用いて腐食状態の可視化を行い，不均一に生じる鉄筋腐食の成長過程や，それと部材表面に現れる腐食ひび割れ幅・密度の関係を分析している．その結果，鉄筋腐食の不均一性は，鉄筋質量減少率の平均値に対して標準偏差が一定となる傾向があり，標準偏差の値はおよそ 10～15%であると述べている．また，腐食ひび割れ幅と鉄筋質量率の関係は，腐食ひび割れ幅が 0.5mm 程度までは線形関係にあるが，それ以上ではばらつきが非常に大きくなったと述べている．

福島ら [31)]は，従来の鋼材腐食を対象とした解析では鋼材腐食がコンクリート構造物内で一様に生じると仮定しているのに対して，鋼材の空間的不均一性を考慮した解析を行い，コンクリート構造物の耐荷性能の低下について評価した．これまでに地震工学をはじめ，様々な分野に応用されてきた SRM（Spectal Representation Method）を用いることで，鋼材腐食の空間変動性を考慮した損傷確率の算定を実現させた．新潟，宇和島の海岸から 0.1km 離れた PC 桁を対象とした耐荷性能評価の試計算を実施したところ，鋼材腐食の空間的不均一性を考慮すると，空間的に均一であると仮定したケースに比べて，明らかに損傷確率が大きくなると述べている．

新谷ら [32)]は，ニューラル・ネットワークのアルゴリズムの一つである Long Short-Term Memory（LSTM）を用いて，軸方向鉄筋 1 本を有する RC はりに生じる腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食量分布を推定する研究を実施した．LSTM を用いると精度良く鉄筋腐食量分布を再現できると述べている．さらに，非線形有限要素解析（Non-FEA）とモデル誤差を考慮したモンテカルロ・シミュレーション（以後，MCS と記す）を実施して，腐食 RC はりが保有する曲げ耐力の確率密度関数を算出した．その上で，腐食ひび割れ幅分布の違いが劣化した RC 部材の残存耐力の確率密度関数に及ぼす影響

等を考察している．

山田ら[33)]は，軸方向鉄筋を1本有するRCはりを対象とした新谷ら[32)]のモデルを拡張して，軸方向に複数本入っている鉄筋のひび割れ幅分布の情報から，劣化RC部材内にある軸方向鉄筋の鉄筋腐食分布を推定する研究を実施した．研究にはpix2pixという，画像を生成する機械学習と，生成された画像が偽画像かどうか判定する機械学習とを競わせて，より良い画像を作り出す敵対的生成ネットワーク（GAN : Generative Adversarial Network）を用いている．生成された鉄筋腐食分布からMCSと3次元非線形有限要素解析（Non-FEA）を用いて曲げ耐力の確率分布を算出し，腐食ひび割れ幅分布の違いが劣化RC部材の耐荷力の確率密度分布に影響を及ぼすと述べている．

維持管理に範囲を拡げて空間分布推定の文献を調査すると，兵頭ら[34)]が桟橋上部工における塩化物イオン量の離散的なデータから劣化状態分布を推定する研究を実施している．推定する手法には地球統計学の中心的な手法であるクリギングと呼ばれる手法を用いていた[35)]．クリギングは，確率場のある領域内の任意地点におけるデータを，領域内のいろいろな位置で計測された確率場のデータから推定する空間統計学手法である．1950年代初頭に，南アフリカの鉱山技師D.G.Krigeと統計学者H.S.Sichelが鉱山資源埋蔵量の算出法を改善する目的で考案した．

地盤工学および地震工学の分野ではクリギングを用いた多くの研究が行われている．田中ら[36)]は，放射性廃棄物の埋設処分に用いるベントナイト系人工バリアの透水性の評価にクリギングを適用している．現場締固めにより施工したベントナイト地盤から採取した試料の密度または透水性に関するデータをもとに，クリギングを用いてベントナイト地盤中の透水性分布を推定し，ベントナイト地盤の不均一性を考慮したマクロ透水係数による透水性の評価を提案した．

大橋ら[37)]は，老朽化したため池の耐震性を評価するためにため池堤体の三次元モデルを作成し，三次元地震応答解析を実施した．三次元のモデル化において，ドローンを用いた三次元計測により表面形状を作成した．地中内部の地盤剛性は電気コーン貫入試験（CPTu）およびスクリューウェイト貫入試験（SWS）の結果を用いた．試験結果は点推定であるため，それを空間的に補完するためにクリギングを用いている．地中内部の地盤剛性が均質なモデルに比べて，クリギングを用いた不均質モデルは堤体の局所的な応答加速度の集中を把握することができると述べている．

小嶋ら[38)]は，常時微動のアレイ観測による位相速度に基づいて，福井平野周辺の第三紀基盤岩までのS波速度構造モデルの算出を試みた．その際，Rayleigh波位相速度をターゲットとした逆解析によるアレイ観測地点のS波速度構造を求めた上で，S波速度構造およびH/Vスペクトルから判読された卓越周期からクリギングを用いて空間分布推定を行っている．その結果，弾性波探査，重力異常に基づく密度構造などと調和的であり，地震被害予測に供する基礎データになりうると述べている．

長尾ら[39]は，港湾構造物の設計地震動の設定において，サイト増幅特性の簡易評価手法の研究を実施した．これまでに提案しているサイト増幅特性の簡易評価手法（ピーク周波数法）に加えて，対象地点の近傍のサイト増幅特性からクリギング法を用いて対象地点のサイト増幅特性の補正を行う方法を提案した．近畿地方および九州地方の港湾を対象にピーク周波数法とクリギング法を比較したところ，対象とした港湾の多くはクリギング法の方が精度良く増幅特性を評価できると述べている．

これらのクリギング法を適用した研究のうち，大橋ら[37]や小嶋ら[38]の研究では，主となる変数と相関のあると考えらえる他の変数を参考変数として用いて作成したモデルより空間分布推定を行っている．互いに相関を持つ多変量確率場に対するクリギング法は，一変数で空間分布推定を行うクリギング法と区別する場合，コクリギングあるいは共クリギングと呼ばれる．

近年，コンピュータの飛躍的な発展と相まって，機械学習の技術が脚光を浴び，目覚ましい発展を続けている．現在，機械学習のアルゴリズムの一つとしてガウス過程回帰（Gaussian Process Regression，以下では GPR と記す）と呼ばれる考え方が注目されている[40),41]. これは, 原理的な方法論としての内容はクリギング法と同一と言える．しかし，クリギング法は 2 次元・3 次元空間上のデータ解析の立場から定式化されているのに対し, GPR は一般的な N 次元データを対象として定式されている点で違いがある[41].

富澤ら[42]は，地盤構造物の安全性を適切に評価するために必要となる地盤物性値の空間分布を，GPR を用いて推定する検討を実施した．利根川堤防周辺で実施したコーン貫入試験による 3 種類の物性値を用いて，それらの間の相関性を考慮して空間分布推定した．GPR による空間分布推定手法を拡張して，ランダム成分については複数の計測データの相関を考慮する手法を採用したところ，複数の計測データの相関を考慮しない場合に比べて，推定の不確定性が減少したと述べている．また，富澤ら[43]は，コーン貫入試験で計測された 2 種類の試験データを対象に 1 次元と 3 次元空間データのランダム成分を対象に自己相関関数の検討を行っている．情報量基準 AIC および BIC を用いて評価したところ, Whittle-Matern や Gaussian-Markovian 相加平均モデルが良好な結果となったと述べている．

2.4 RC 構造物の信頼性評価

構造物の安全性を定量的に評価する方法として信頼性理論がある．信頼性理論は，構造物の設計変数の不確定性を考慮して構造物の安全性の定量化を図ることが出来る．本研究の対象としている鉄筋腐食および腐食ひび割れ幅は，非常に不確定性が大きな劣化現象である．この劣化現象の現状評価および将来予測を行うためには，信頼性理論を導入した検討が必要であると考える．そこで，構造物の耐久性評価および経年劣化に対して信頼性理論を用いた既往の文献を調査した．

2000 年中頃より，秋山が中心となり信頼性理論に基づく耐久性設計手法の研究を行い，いくつかの論文を発表している．伊藤ら [44]は，コンクリート構造物の環境劣化作用に対する性能照査の動きに対して，信頼性理論に基づく限界状態設計法の枠組みの中での実現を目標とした研究を実施した．その基礎研究として，塩害劣化作用を受ける RC 構造物の損傷確率の定量化を試みた．時間的ばらつきを考慮した確率モデルに基づき，塩害劣化作用のハザード曲線を作成した．また，鋼材腐食発生限界濃度を限界状態として，塩化物イオンの浸透予測に伴うばらつきを考慮したフラジリティ曲線を作成し，ハザード曲線と組み合わせることで RC 構造物に生じる鋼材腐食の発生確率を定量化した．ハザードおよびフラジリティ曲線の作成には MCS を用いている．提示した手法を用いることにより，現行の RC 構造物の海岸線からの距離に応じたかぶり厚の規定に頼らずに，等しい耐久信頼性を有する RC 構造物を設計できる可能性があると述べている．

伊藤ら [44]は鋼材腐食発生限界濃度を限界状態として RC 構造物に生じる鋼材腐食の発生確率を定量化したが，佐藤ら [45]は限界状態を鉄筋腐食発生点から腐食ひび割れ発生点に変更した検討を実施した．腐食ひび割れの発生確率を定量化することにより，現行の設計かぶりを大きく低減できる可能性を示した．

秋山ら [46]は，塩害を受ける RC 橋脚を対象として，信頼性理論を用いて，耐震安全性を設計耐用期間内で確保するための耐震設計と耐久設計の在り方を検討した．耐久設計では，設定した限界鉄筋腐食量に対して，信頼性設計に基づいた鉄筋かぶりの算定方法が示されていた．鉄筋かぶりの算定には，伊藤ら [44]等で構築した材料劣化の進展モデルおよび損傷確率の算定方法を採用した．損傷確率の算定に用いた解析手法は MCS である．最終的に，得られた損傷確率に基づく部分係数と設計基準式を提案している．

狩野ら [48]は，海洋環境下にある既設 RC 構造物の耐久性照査に対して，限界状態を鉄筋腐食の発生点とし，照査で用いる部分係数算定手順についての検討を実施した．塩化物イオン濃度分布を既設構造物の点検・検査情報の例として取り上げ，点検・検

査情報が得られた場合における耐久性照査式の部分係数の設定方法が示している．点検・調査情報にしたがって，後述する吉田ら[49]らの SMCS（Sequential Monte Carlo Simulation）による更新理論に基づいて各変数の確率密度関数を修正することで，点検・調査情報がない場合に比べて部分係数を小さく設定できる．したがって，既設構造物の耐久性照査の合理化を図ることが可能であると述べている．

秋山らの耐久性設計手法の研究は，新設 RC 構造物を対象としているのに対して，既往の文献調査によれば，信頼性理論を用いて既設 RC 構造物を対象とした現状評価および将来予測の研究もおこなわれている．森川ら[50]は，塩害により劣化が生じた RC 橋を対象に，信頼性解析を用いて，種々の不確定性を考慮して安全性を合理的に評価する手法について検討を行った．そこでは，劣化因子および設計変数の不確定性の定量化を行い，MCS を用いた劣化予測の検討を実施している．劣化予測結果より安全性の指標として β を用いた安全性予測式の作成が行われた．また，既設構造物の維持管理において実施される点検・調査データを劣化予測に用いる方法についても検討が行われており，ベイズの更新理論を用いた方法が示されている．そして，鉄筋の腐食減量率のばらつきは大きいため，劣化予測では不確定性を考慮することが重要であると述べている．

貝戸らは[51]は，いくつかにランク分けした劣化状態の推移確率推定モデル（論文中ではマルコフ劣化ハザードモデルと命名）を，目視点検データに基づいて構築した．モデルの精度を向上させるためには，多くの目視点検データが必要であるが，モデル作成の段階において十分なデータが蓄積されていることは少ないと述べている．そこで，データの蓄積とともに蓄積されたデータに基づき逐次推定モデルを更新することが可能な方法論の構築の必要性を説き，ベイズ推定に基づいた逐次更新型の予測手法を提案している．これまでの状態推移確率推定モデルに対して MCMC（Markov chain Monte Carlo methods）を用いたベイズ推定の方法論を述べている．NY 市が管理する橋梁の RC 床版に対する目視点検結果を用いて，マルコフ劣化ハザードモデルへのベイズ推定法の有効性を実証的に検証した．橋梁マネジメントシステム（BMS）の精度向上に役立つと述べている．

竹中ら[52]は，海洋環境にある RC 構造物の予測モデルに状態推移確率モデルを適用した既事例に対して，目視調査により得られた RC 構造物の劣化状態を観測量とし，その観測量を再現できる推移確率を SMCS により更新する方法を提案している．桟橋上部工に提案手法を適用し，2 回実施された点検において，1 回目の目視調査情報を踏まえて推移確率を更新することで，2 回目の目視調査結果に近い劣化状態を予測できた事例となっている．貝戸ら[51]が橋梁マネジメントシステム（BMS）への適用性の検討を実施しているのに対して，個別 RC 構造物の劣化評価の精度向上を目指した研究である．

吉田ら[49)]は，既設構造物の適切な信頼性評価を行うには劣化メカニズムに関する知見をできる限り取り込むことに加え，各サイトにおける何らかの点検，検査データを有効に反映させせることが重要であると述べている．そして，現場位置で得られる観測情報から劣化予測に関わるパラメータの確率分布を更新し，それに基づく構造物の限界状態超過確率を算定する方法について研究を行った．SMCS に基づく更新のための定式化を行い，線形の簡単なモデルを用いて確認した後，RC 構造物の塩害劣化予測モデルのパラメータ更新，さらに 3 種類の限界状態確率の更新事例を示している．

既設 RC 構造物の現状評価および将来予測は，劣化の物理モデルを用いる方法[44)~50)]と，構造物の劣化状態をランク分けして評価する方法[51),52)]の 2 種類の方法に大きく分けられる．物理モデルの研究のうち佐藤ら[45)]，秋山[46)]，吉田ら[49)]および森川ら[50)]では，鉄筋の腐食速度を用いて既設 RC 構造物の将来予測を行っていた．

佐藤ら[45)]は，腐食ひび割れ発生前の腐食速度を既往の実験データ[53)~ 55)]の分析結果より求めた式(2.10)を用いて検討を実施した．

$$v = 2.718\exp\{(0.0038W/C + 0.1693)Cl^{-}\} \cdot C^{-0.5} \tag{2.10}$$

ここに，v：腐食速度 (mg/cm^2/年)
W/C：水セメント比 (%)
Cl^-：塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
C：かぶり (mm)

松崎ら[46)]は，腐食ひび割れ発生前の腐食速度を中川ら[56)]の研究に基づいて v=6.1mg/cm^2/年（0.19%/年）として検討を実施していた．森川ら[50)]は「鉄筋腐食・防食及び補修に関する技術の現状と今後の動向（その 2)，コンクリート技術シリーズ 40」[57)]に基づいて進展期の腐食速度として v=0.002mm/年を用いて検討を実施していた．吉田ら[49)]はひび割れ発生前の腐食速度として v=6.1mg/cm^2/年（0.19%/年）を，ひび割れ発生後の腐食速度として v=79.3mg/cm^2/年（2.46%/年）を用いて検討を実施した．なお，森川らが用いた v=0.002mm/年は，mg/cm^2/年に換算すると 1.57 mg/cm^2/年に相当する．鉄筋の腐食速度は，既設 RC 構造物の将来予測をする上で重要なパラメータであると考えるが，既往の研究を踏まえた統一的な評価には至っていないようである．

参考文献（第 2 章）

1) 武若耕司，松本進：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響，第 6 回コンクリート工学年次論文集，pp.177-180，1984.
2) 田森清美，丸山久一，橋本親典，小田川昌史：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988.
3) 木村哲士，丸山久一，濱田宏：RC 部材における鉄筋腐食の定量的評価方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.771-776，1996.
4) 岸雅之，森川英典，大山真一：鉄筋腐食劣化を考慮した RC 部材の性能評価の評点化手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1171-1176，2001.
5) 亓路寛，関博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集，No.669，pp.161-171，　2001.
6) 岡崎雅弘，下村匠，松尾洋：鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.857-862，2003.
7) 荒木弘祐，高谷哲，服部篤史，宮川豊章：弾性体を用いた鉄筋腐食膨張のモデル実験におけるひび割れ幅と換算腐食減量の関係，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.61st，Disk.2，　pp.91-92，2006.
8) 道正泰弘，小島正朗：鉄筋腐食ひび割れ幅による鉄筋腐食量の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，　No.1，pp.1180-1185，2014.6
9) 橘高義典，小安健太，松沢晃一，刈田祥彦：X 線撮影により得られる鉄筋腐食減量とコンクリートの表面ひび割れとの関係について,コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1131-1136，2016.
10) 篠原保二，丸山裕生，山下海斗，南正樹：腐食鉄筋によるひび割れ発生前後の腐食挙動およびひび割れ進展，日本建築学会構造系論文集 No.728，pp.1609-1618，2016.
11) 大塚尊之，山本貴士，　高谷哲，　高橋良和：腐食ひび割れ幅から推定した腐食量による鉄筋腐食 RC はりの曲げ耐荷力推定，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.72nd，pp.313-314，2017.
12) 山崎理美，大下英吉：鉄筋腐食が腐食ひび割れおよび拘束圧に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36 ，No.1，pp.1150-1155，2014.
13) 濱田宏，丸山久一，木村哲士：ひび割れによる内部鉄筋腐食区間の推定，土木学会第 51 回年次学術講演会，V-150，pp.300-301，1996.
14) 濱田宏，丸山久一，下村匠，青山敏幸：腐食性環境下における鉄筋コンクリート

構造物の劣化予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.811-816，1997.
15) 中村則清，橘高義典：鉄筋の腐食に伴うコンクリートの表面ひび割れ開口に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.871-876，1996.
16) 松島学，横田優，関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004.
17) 堀口賢一，武田均，丸屋剛：塩害による鉄筋腐食の定量的評価−ひび割れ幅,コンクリート表面の隆起量から鉄筋腐食量を推定,大成建設技術センター報,pp.20.1-20.7，2004.
18) 村上祐貴，山内佑樹，堤知明，大下英吉：鉄筋腐食したRC梁部材の残存耐力に及ぼすせん断補強筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.727-732，2006.
19) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食したＲＣ梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究，土木学会論文集E，Vol.64，No.4，pp.631-649，2008.
20) 松田耕作，横田優，莪山和樹，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.30，No.1，pp.807-812，2008.
21) 村上将也，山本佳士，黒田一郎，古屋信明：鉄筋腐食させたRC梁の残存曲げ耐荷力特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1095-1100，2008.
22) 河村圭亮，中村光， 国枝稔，上田尚史：鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1075-1080，2009.
23) 村上祐貴，董衛，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じたRCはり部材の耐荷性状評価，土木学会論文集Ｅ2，Vol.67，No.4，pp.605-624，2011.
24) 足助美岐子，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食率に基づく腐食ひび割れ幅推定手法に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.66th，V-233，pp.465-466，2011.
25) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.
26) 西澤彩，高谷哲，中村士郎，宮川豊章：腐食性生成物の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol35，No1，pp1051-1056，

2013.

27) 足助美岐子，大下英吉：腐食生成物の力学的特性を加味した腐食ひび割れ幅進展モデルの構築に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.68th，V-233，pp.465-466，2013.

28) 刈谷潤貴，高木大地，村上祐貴：腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧が鉄筋腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1174-1179，2014.

29) 黒田一郎：複数の腐食鉄筋を有する RC 梁部材の非破壊検査による鉄筋断面積減少率と曲げ耐力の推定方法, コンクリート工学論文集, 第 27 巻, pp.43-55, 2016.

30) 秋山充良，中嶋啓太，小森谷隆：X 線撮影を用いた RC 部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.3，pp.35-45，2011.

31) 福島広之，櫻井絢子，宮本祥平，秋山充良：塩害環境下にある PC 桁に生じる鋼材腐食の空間変動の確率･統計的表現とそのライフサイクル信頼性解析に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1561-1566，2016.

32) 新谷美菜，秋山充良，張明陽，辛寄語：LSTM を用いた腐食ひび割れを有する RC 梁部材の残存耐荷力推定に関する確率論的考察，AI･データサイエンス論文集，Vol.1，No.J1，pp.117-121，2020.

33) 山田大樹，新谷美菜，辛寄語，秋山充良：pix2pix と腐食ひび割れ幅情報を用いた劣化 RC 部材内の 2 次元鉄筋腐食分布の推定および残存耐荷力の確率論的評価，AI・データサイエンス論文集，J2 号，2 巻，pp.47-84，2021.

34) 兵頭武志，北里新一郎，本城勇介，大竹雄：空間統計学を利用した港湾コンクリート構造物の効率的な維持管理に関する研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69，No.2，pp.I_191-I_196，2013.

35) 間瀬茂：地球統計学とクリギング法 R と GeoR によるデータ解析，オーム社，2010.

36) 田中幸久，中村邦彦，工藤康二，廣永道彦，仲神元順，庭瀬一仁，小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価，土木学会論文集 C，Vol.63，No.1，pp.207-223，2007.

37) 大橋亮太，西村伸一，金重稔，柴田俊文，珠久隆行：地質統計手法と三次元計測に基づくため池堤体の地震応答解析, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.78, No.2, pp.140-152，2022.

38) 小嶋啓介，本耕大：常時微動アレイ観測に基づく福井平野の S 波速度構造の推定：土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.1，pp.98-109，2012.

39) 長尾毅，福田健，伊藤佳洋，山田雅行：近畿地方及び九州地方の港湾におけるサ

イト増幅特性の簡易評価，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.72，No.2，pp.I_485-I_490，2016.

40) Rasmussen.C.E, Williams.C.K.I: Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press, 2006.

41) 持橋大地，大羽成征：ガウス過程と機械学習，講談社，2019.

42) 富澤幸久，吉田郁政，大竹雄：ガウス過程回帰を用いた複数の地盤物性値間の相関を考慮した空間分布推定，AI・データサイエンス論文集，J2 号，2 巻，pp.617-625，2021.

43) 富澤幸久，吉田郁政，大竹雄：ガウス過程回帰を用いた地盤物性値の空間分布推定におけるランダム成分の自己相関関数の比較，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.77，No.2(応用力学論文集 Vol.24)，pp.I_485-I_494，2021.

44) 伊藤佑香，秋山充良，鈴木基行：耐久設計に用いる塩害劣化作用の確率モデルに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1477-1482，2005.

45) 佐藤広和，李月鳳，秋山充良，鈴木基行：腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1071-1076，2007.

46) 秋山充良，松崎裕，佐藤広和，内藤英樹，鈴木基行：塩害環境下にある RC 橋脚の耐震安全性確保の観点から定めた限界鉄筋腐食量とその耐久設計法に関する確率的考察，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.541-559，2008.

47) 吉田郁政，秋山充良，鈴木修一，山上雅人：Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A，Vol.65，No.3，pp.758-775，2009.

48) 狩野淳一，秋山充良，吉田郁政：点検・検査情報を活用した既存 RC 構造物の耐久性照査に用いる部分係数，構造工学論文集，Vol.61A，pp.81-90，2015.3

49) 吉田郁政，秋山充良，鈴木修一，山上雅人：Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A，Vol.65，No.3，pp.758-775，2009.

50) 森川英典，森田祐介，小島大祐：不確定性を考慮した塩害劣化 RC 橋における劣化および安全性の評価，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.145-158，2006.

51) 貝戸清之，小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.336-355，2007.

52) 竹中孔信，荻野統也，秋山充良，吉田郁政：更新理論とマルコフ連鎖モデルを用いた鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.1357-1362，2014.

53) 森永繁:鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学博士論文，1986.
54) 松村卓郎，金津努，西内達雄：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法，土木学会論文集，Vol.634/V-45，pp.303-314，1999.
55) 松林裕二，桝田佳寛，笹渕優樹：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp.9-15，2000.
56) 中川貴之，瀬下雄一，鬼束俊一，堤知明：海洋環境下における RC 構造物の鉄筋腐食速度の評価,コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，pp.325-330，2004.
57) 土木学会:鉄筋腐食・防食及び補修に関する研究の現状と今後の動向（その 2），コンクリート技術シリーズ 40，pp.206-212，2000.

第3章 鉄筋腐食量の推定式

3.1　はじめに

本章では第 2 章で述べた鉄筋腐食実験データベースを用いて，腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式について実施した．既往の文献調査で提案されている腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式を参考に推定式の形状の適合性を確認した上で，推定式の基本形状について検討した．設定した推定式の基本形状を拡張して，カテゴリーデータを考慮できる腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式を作成するとともにそのばらつきを分析した．

3.2　既往の推定式における形状の適合性

鉄筋腐食実験データベースを用いた腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定を行うに当たり，既往の文献より 4 種類の推定式の形状を設定し，データベースに対する適合性を調べることにした．岸ら [1)]は，既往の鉄筋腐食実験データに基づき腐食ひび割れ幅－鉄筋質量減少量の関係式を提案している．形状 I は岸らの提案した関係式を参考に設定した．亓ら [2)]は円筒モデルを基本算定モデルとし，鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係を誘導した．誘導式と鉄筋腐食実験データとの関係について検討し，誘導式に補正係数を設定している．形状 II は，その亓らの誘導式を参考に設定した．橘高ら [3)]は数値解析より鉄筋腐食量とひび割れ幅の関係を定式化し，関係式と鉄筋腐食実験の計測値との関係を考察している．形状 III は，橘高らの提案式を参考に設定した．篠原ら [4)]は鉄筋腐食実験を行い，その結果に基づき腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定する式を提案している．形状 IV は，篠原らの提案式を参考に設定した．以下に，4 種類の形状を示す．

形状 I

$$y = \{\alpha_1 \cdot exp(\alpha_2 c/\phi)\}x \tag{3.1}$$

形状Ⅱ

$$y = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)}\left\{\begin{matrix} \alpha_1 \frac{c+\phi}{5c+3\phi} x \\ +\alpha_2 \frac{0.22(2c+\phi)^2+\phi^2}{E(c+\phi)} {f_c'}^{2/3} \end{matrix}\right\} \tag{3.2}$$

形状Ⅲ

$$y = \{-(\alpha_1\phi + \alpha_2 c + \alpha_3) ln(f_c') + \alpha_4\phi + \alpha_5\}x \tag{3.3}$$

形状Ⅳ

$$0 \le x \le 0.2$$
$$y_1 = \alpha_1 \exp(\alpha_2 f_c' + \alpha_3 c)\, x + (\alpha_4 f_c'^2 + \alpha_5 f_c' + \alpha_6)(exp(\alpha_7 c) - 1)$$

$$0.2 \le x \le 0.6$$
$$y_2 = \alpha_8 \exp(\alpha_9 f_c' + \alpha_{10} c)\,(x - 0.2) + y_1 \tag{3.4}$$

ここに，α_1~α_{10}：係数
y, y_1, y_2：鋼材質量減少率（%）
x：腐食ひび割れ幅（mm）
f'_c：コンクリート強度（N/mm^2）
c：純かぶり（mm）
ϕ：鉄筋径（mm）
γ：鉄筋の密度（mg/mm^3）
ρ：腐食生成物の体積膨張率

鉄筋腐食実験データベースの計測結果と設定した 4 種類の形状との適合性を，非線形回帰分析を行い確認した．ただし，2.2.2 において述べたように，収集した鉄筋腐食実験には，1 つの供試体で 1 回だけ腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量を計測したものと，1 つの供試体で経時的に複数回，両者を計測したものが混在している．それらのデータをそのまま用いて分析を行うと経時的に計測された供試体データの影響が大きくなる．そこで，経時的計測データには，鉄筋腐食実験データベースに取り込んだ計測回数の逆数を重みとして与えた重み付き非線形回帰分析を行うことにした．

収集した文献の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の計測結果には，平均値の場合，最大値の場合，平均値と最大値の場合がある．したがって，両者の関係の分析として，平

均－平均の関係，最大－最大の関係，平均－最大の関係及び最大－平均の 4 通りが考えらえる．既往の文献では腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を平均－平均の関係で整理したものが多く，次に最大－最大の関係で整理したものが多い．ただし，平均－平均で整理したデータは最大－最大で整理したデータのおよそ 5 倍であった．収集した鉄筋腐食実験は，様々な腐食条件，コンクリート条件および鉄筋条件で実施したもので，これらを精度よく分析するには多くのデータを必要とする．そのため，本研究では，腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係として，腐食ひび割れ幅[平均]と腐食鉄筋量[平均]の関係を分析することにした．

収集したデータの中には腐食ひび割れ幅が 5cm にも及ぶデータが含まれていた．「ひび割れ調査，補修・補強指針－2013－」[5)]に掲載された各国指針類の許容ひび割れ幅をまとめた表によれば，許容ひび割れ幅の範囲は 0.2~0.5mm である．そこで，許容ひび割れ幅の 2 倍程度で切りの良い 1mm を上限とし，鉄筋腐食実験データベースより 1mm 以下のデータを抽出して検討することにした．

参考にした既往の推定式において，腐食方法，鉄筋種類等のカテゴリーデータは同一条件で検討されている．そこで，カテゴリーデータの条件が同一なデータに絞って適合性を検討することにした．同一条件としたのは，鉄筋腐食実験データベースの 5 項目のカテゴリーデータのうち，腐食方法，鉄筋種類，せん断補強筋の有無および鉄筋配置である．セメント種類は 2.2.2 で述べたように特定できたデータが少ないことと，既往の推定式では考慮されていないことを踏まえて，カテゴリーデータの項目から外すことにした．

腐食方法はデータベース中で最もデータ数が多い電食とした．鉄筋種類は異形鉄筋と丸鋼のうちデータ数が多い異形鉄筋とした．せん断補強筋の有無は，せん断補強筋のない供試体データが多いため，せん断補強筋なしとした．鉄筋配置もデータ数の多さより，供試体中に鉄筋を 1 本配置した供試体データとした．実験データの絞り込み条件を表 3-1 に示す．絞り込みを行った結果，推定式の評価に用いたデータ数は 321 データとなった．

参考とした既往の推定式 [1)~4)]は，いずれも鉄筋腐食量の指標として鋼材質量減少量を用いていた．しかし，鋼材質量減少量に比べて鋼材質量減少率の方が，鉄筋腐食の程度をイメージしやすいと考え，推定対象を鋼材質量減少率として 4 種類の形状に対する重み付き非線形回帰分析を実施した．設定した形状の適合性の確認には，推定値と実験値の重相関係数と AIC[6)]を用いた．

表 3-2 に，分析結果より求めた重相関係数と AIC を示す．また，図 3-1 から図 3-4 に各形状の適合性に関する分析結果を示す．左側の図は，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係について，実験値と推定値を重ね書きしたものである．黒丸で実験値，赤丸で推定値を示した．右側の図は，実験値と推定値の鋼材質量減少率を図化したも

ので，横軸が推定値，縦軸が実験値の値である．表 3-2 に示した重相関係数から判断すると，いずれの形状も推定値と実験値の相関は高く，良好な推定が行えている．その中でも，形状 IV は，重相関係数が最も大きく，AIC が最も小さい値となっており，最も良好な適合性を示した．図 3-4 からも，他の形状に比べて適合性が良い傾向が確認できる．

表 3-1 検討データの絞り込み条件

腐食方法	鉄筋種類	せん断補強筋	鉄筋配置
電食	異形鉄筋	なし	1本

表 3-2 既往推定式の形状の適合性

推定式の形状	非線形回帰分析		回帰係数の数
	重相関係数	AIC	
I	0.78	1601	2
II	0.76	1635	2
III	0.81	1557	5
IV	0.90	1385	10

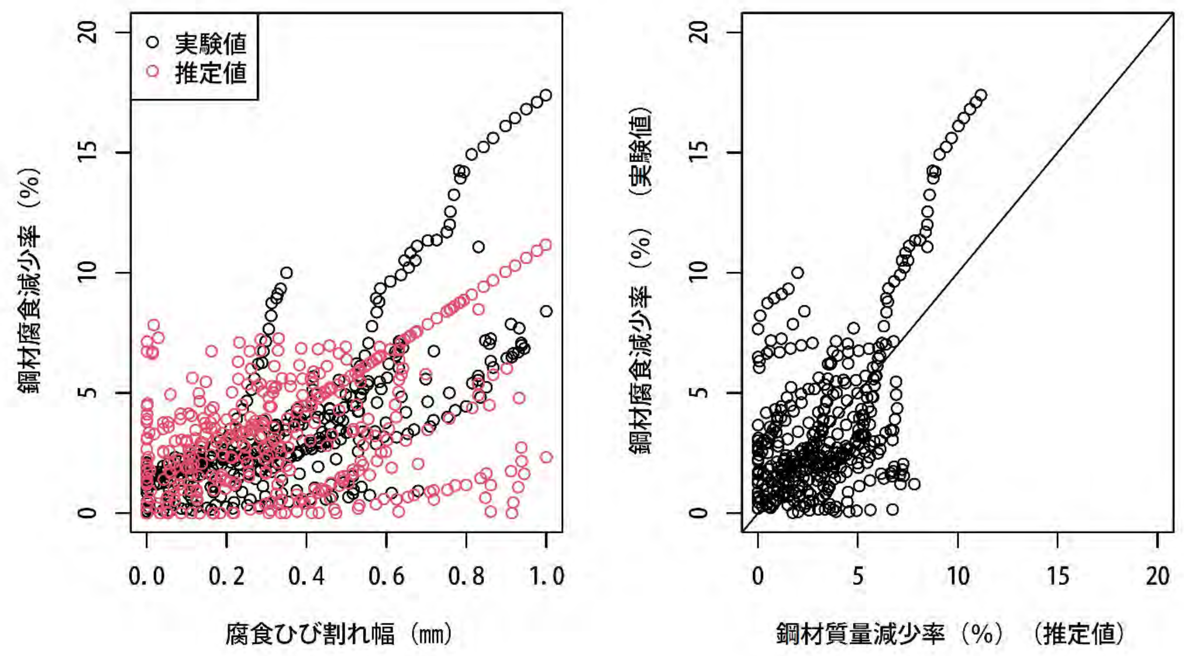


図 3-1 形状 I の適合性

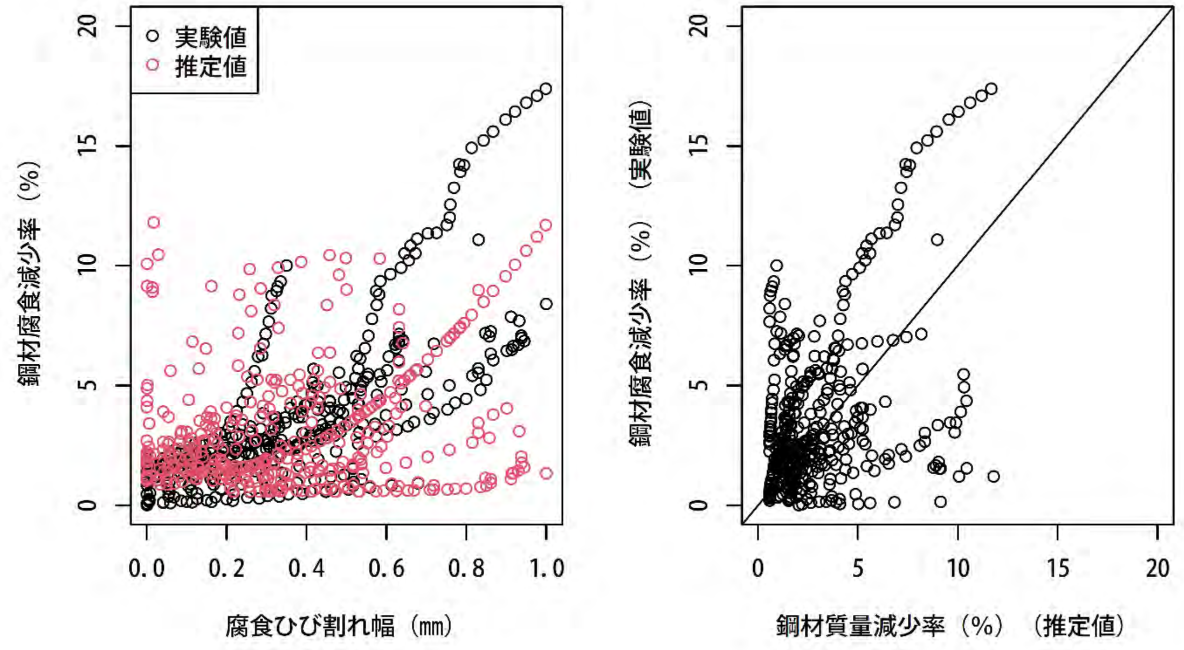


図 3-2 形状 II の適合性

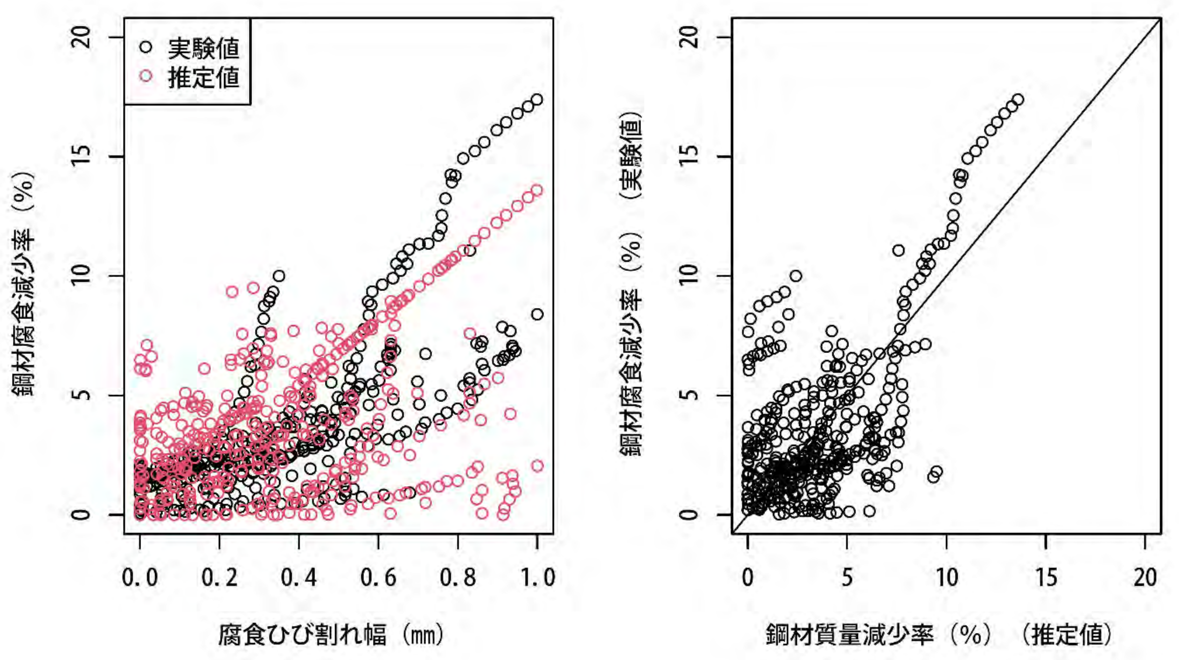


図 3-3 形状Ⅲの適合性

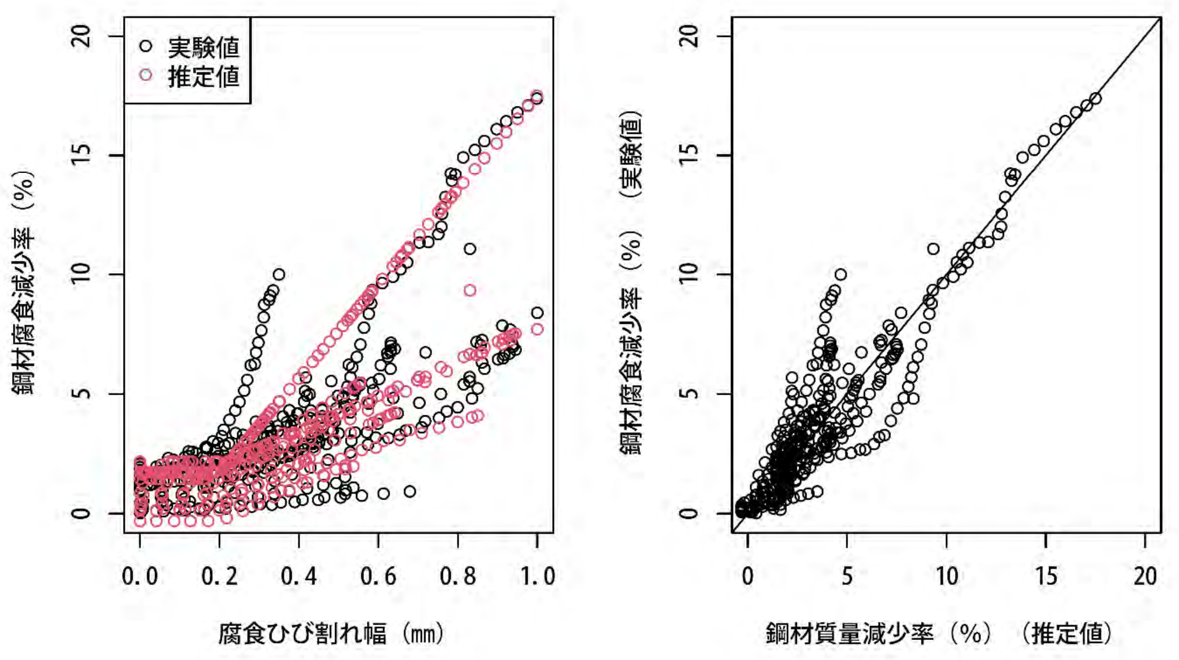


図 3-4 形状Ⅳの適合性

3.3 推定式の基本形状検討

3.3.1 基本形状の改良概要

3.2 の検討結果を踏まえて，鉄筋腐食量の推定に適した推定式の基本形状を検討する．本検討では，まず，3.2 と同様に絞り込んだ実験データを用いて推定式の基本形状を設定する．次に，絞り込み条件を外した状態で鉄筋腐食実験データベースから抽出したデータを用いてカテゴリーデータの影響にも対応した推定式の検討を行う．

3.2 の回帰分析によれば，形状 IV が最も適合性が高いとの知見を得たが，形状 IV は 10 の回帰係数を持つ．パラメータが多く，さらにカテゴリーデータの影響を考慮する回帰係数を追加すると，非常に複雑な推定式になる．推定式の基本形状は，回帰係数が少なく，かつ，適合性の良い推定式を設定するのが好ましい．そのような観点で表 3-2 を見ると，形状 I と II の回帰係数の数は同じであるが，形状 I は形状 II より適合性が高い．形状 I と III では，形状 III の適合性が高いものの，5 つの回帰係数を必要とする．また，両者の適合性は，形状 III と IV の適合性ほどの開きは生じていない．本検討では，鉄筋腐食実験データベースのデータを統計的手法で分析する上で，形状 I を発展させることにより適合性を高めた推定式の基本形状を設定することにした．

形状 I と III は，腐食ひび割れ幅が 0mm のとき，鉄筋腐食は生じていないことになる．横軸 x を腐食ひび割れ幅，縦軸 y を鋼材質量減少率としたグラフにおいて，両形状の骨格は $y=ax$ である．一方，形状 II と IV は，腐食ひび割れが生じたときには一定量の鉄筋腐食が生じている形状になっており，両形状の骨格は $y=ax+b$ である．腐食ひび割れが鉄筋の腐食膨張により生じることを考慮すると，形状の骨格は $y=ax+b$ の形が好ましい．そこで，形状 I に腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食を考慮するための検討を行う．

3.2 で設定した形状には,腐食ひび割れ幅以外の説明変数としてコンクリート強度，純かぶりおよび鉄筋径を用いている．そのうち，純かぶりはいずれの形状でも用いているが，コンクリート強度は形状 I で，鉄筋径は IV では用いていない．腐食による鉄筋の膨張で生じる引張力によりコンクリートにひび割れが発生すると考えると，コンクリート強度は考慮すべき説明変数である．また，鉄筋径も腐食ひび割れに影響することが，形状 I，II および III を設定する際に参考とした文献 [1)~3)]以外でも述べられており [7),8)]，基本形状の説明変数として考慮すべきと考えた．本検討では鋼材質量減少率を推定する説明変数として，腐食ひび割れ幅，純かぶり，コンクリート強度および鉄筋径を用いた基本形状について検討する．したがって，形状 I に説明変数としてコンクリート強度の影響を考慮する検討を行う．

3.3.2 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量

腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率（y 切片 b）を，コンクリート強度 f'_c，純かぶり c および鉄筋径 ϕ を用いてモデル化した．c および ϕ は形状 I で用いた c/ϕ の関数 A とし，f'_c は f'_c 単独の関数 B を考え，両者の積 A・B でモデル化した．関数には，値をそのまま用いる場合と指数関数，対数関数およびべき関数を考え，それらの組み合わせを行った．その結果，検討モデルは表 3-3 に示す 16 モデルとなった．

これらの腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率のモデルに対して，3.2 で用いたデータのうち腐食ひび割れ幅が十分に小さい範囲のデータで非線形回帰分析を実施した．検討モデルの適合性は重相関係数と AIC により確認した．なお，コンクリートのひび割れ調査では 0.05mm 以上のひび割れ幅を記録の対象としていることを踏まえ [5)]，それより小さい値で，かつデータ数を確保できる腐食ひび割れ幅 0.02mm を閾値とした．対象データは 29 データとなった．

表 3-3 に，各モデルの分析結果より求めた重相関係数と AIC を示す．また，各モデルの適合性の分析結果を図 3-5 に示す．各図の左側には，腐食ひび割れ幅に対する鋼材質量減少率の実験値と推定値の関係を示した．黒丸が実験値，赤丸が推定値である．右側には，鋼材質量減少率の推定値と実験値の関係を示した．

表 3-3 および図 3-5 によれば，コンクリート強度 f'_c は，f'_c 単独の関数の場合と対数関数の場合には，適合性が極端に悪くなる傾向が見られた．検討ケース 7 のモデルが，重相関係数が最も大きく，AIC が最も小さい値となり，最も良好な適合性を示した．以降では，式(3.5)に示す検討ケース 7 のモデル式を用いて検討を行う．

$$y_0 = \alpha_1 exp(\alpha_2 f'_c) \cdot (c/\phi)^{\alpha_3} \tag{3.5}$$

ここに，y_0：腐食ひび割れ幅 0mm 近傍での鋼材質量減少率（%）

α_1~α_3：回帰係数

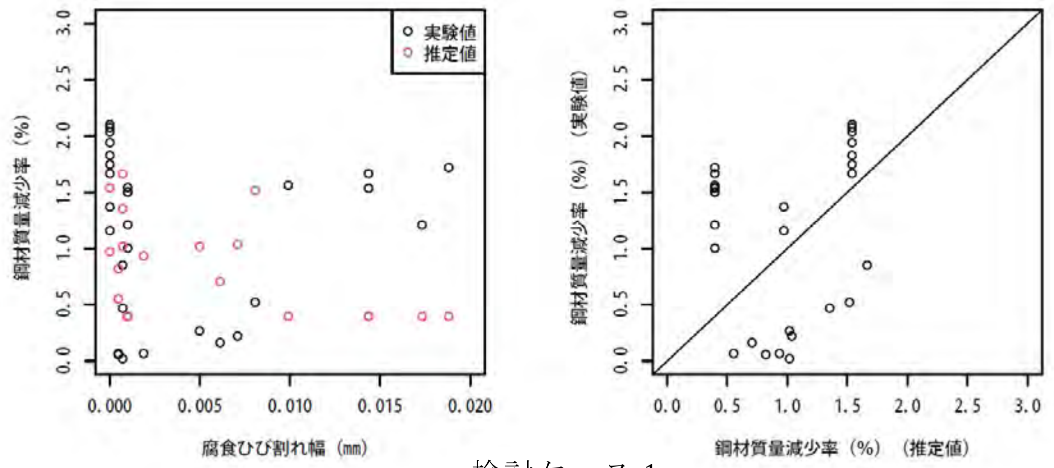
f'_c：コンクリート強度（N/mm^2）

c　：かぶり（mm）

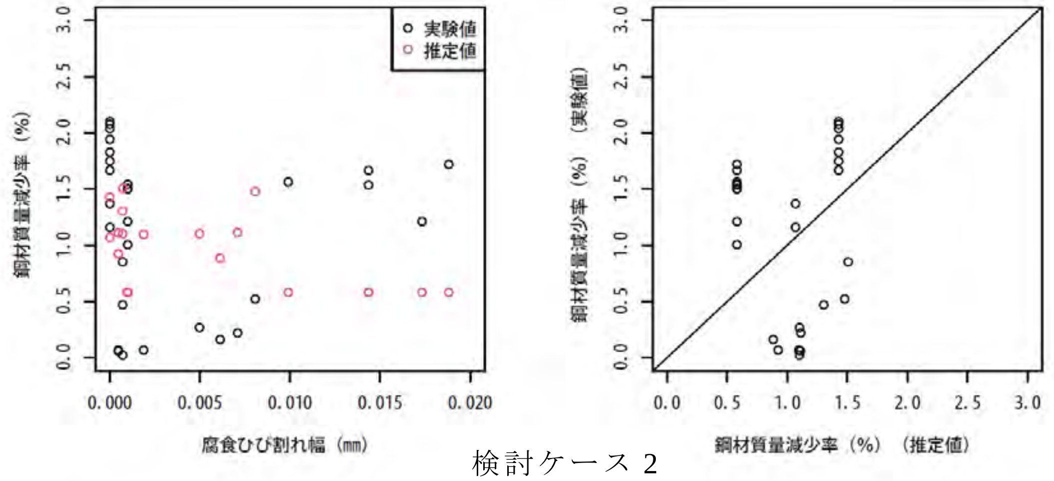
ϕ　：鉄筋径（mm）

表 3-3 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルとその適合性

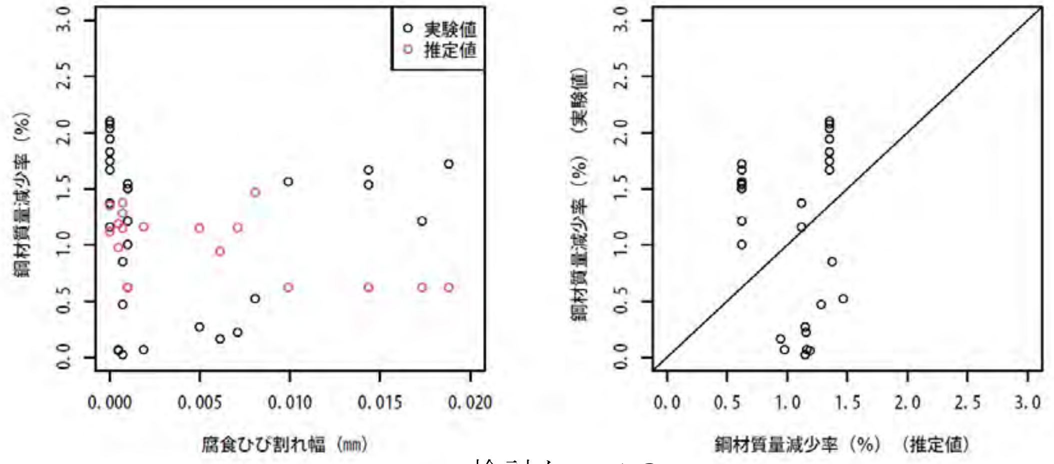
ケース	A	B	重相関係数	AIC
1	$f'c$	c/ϕ	0.132	74.6
2	$f'c$	$\exp(\alpha_3(c/\phi))$	0.010	74.5
3	$f'c$	$(c/\phi)^{\alpha3}$	-0.087	75.1
4	$f'c$	$\ln(c/\phi)$	0.116	76.8
5	$\exp(\alpha_2 f'c)$	c/ϕ	0.744	50.5
6	$\exp(\alpha_2 f'c)$	$\exp(\alpha_3(c/\phi))$	0.764	44.3
7	$\exp(\alpha_2 f'c)$	$(c/\phi)^{\alpha3}$	0.770	43.4
8	$\exp(\alpha_2 f'c)$	$\ln(c/\phi)$	0.708	51.3
9	$f'c^{\alpha2}$	c/ϕ	0.752	50.3
10	$f'c^{\alpha2}$	$\exp(\alpha_3(c/\phi))$	0.769	43.7
11	$f'c^{\alpha2}$	$(c/\phi)^{\alpha3}$	0.643	63.8
12	$f'c^{\alpha2}$	$\ln(c/\phi)$	0.721	50.8
13	$\ln(f'c)$	c/ϕ	0.211	69.3
14	$\ln(f'c)$	$\exp(\alpha_3(c/\phi))$	0.149	68.0
15	$\ln(f'c)$	$(c/\phi)^{\alpha3}$	0.060	68.8
16	$\ln(f'c)$	$\ln(c/\phi)$	0.345	72.6



検討ケース 1

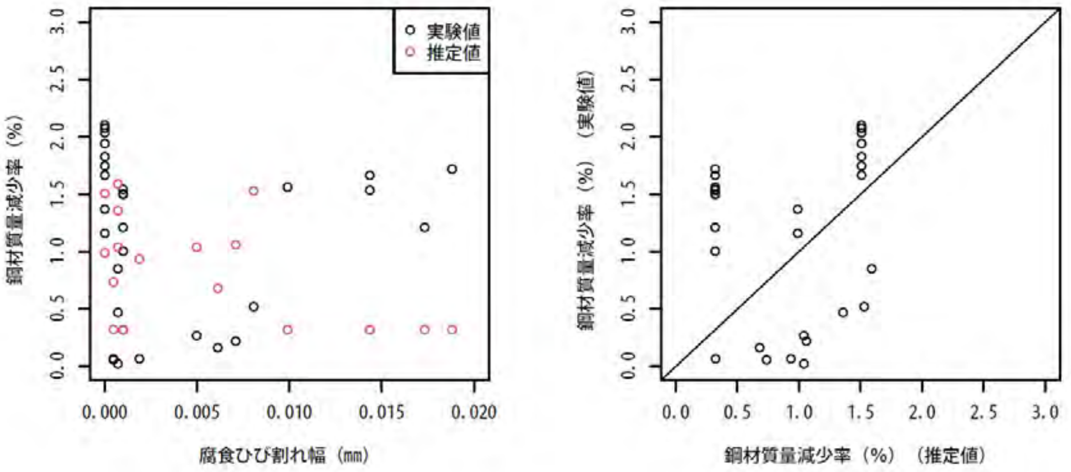


検討ケース 2

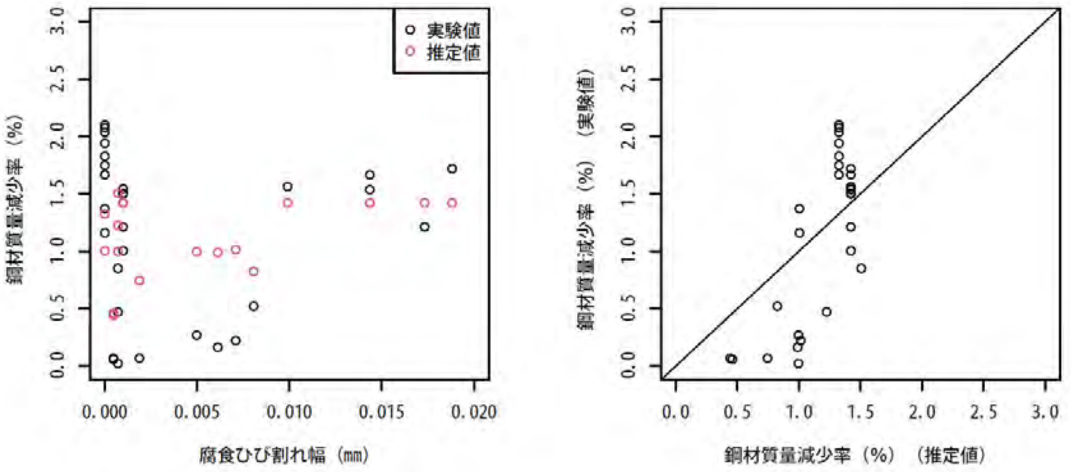


検討ケース 3

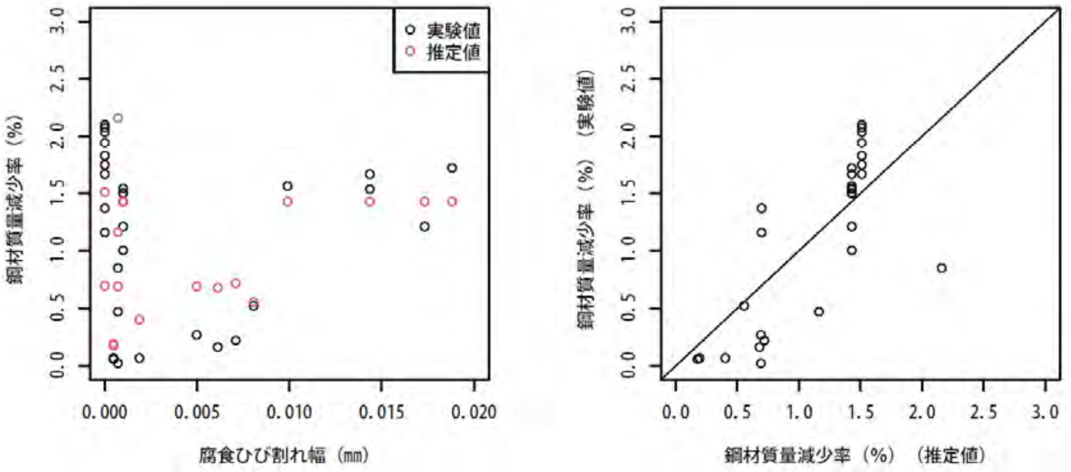
図 3-5(1) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果



検討ケース 4

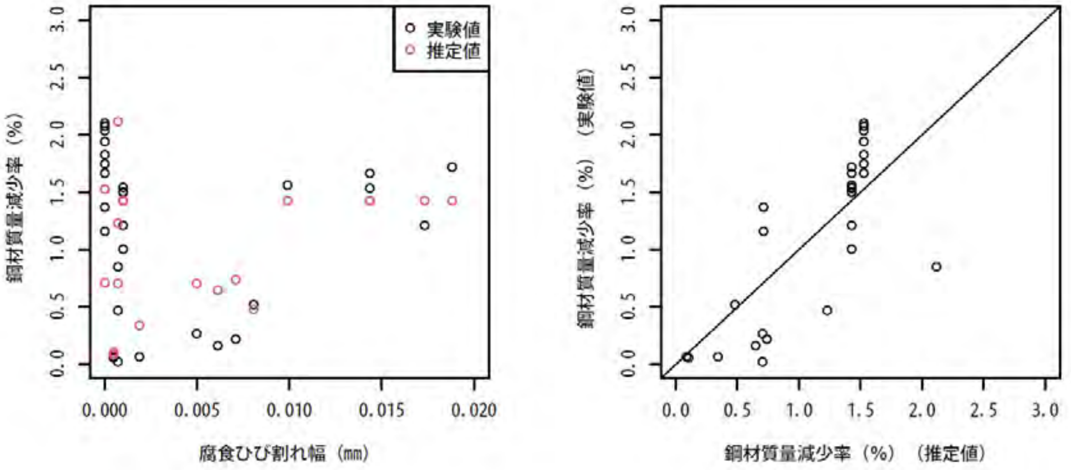


検討ケース 5

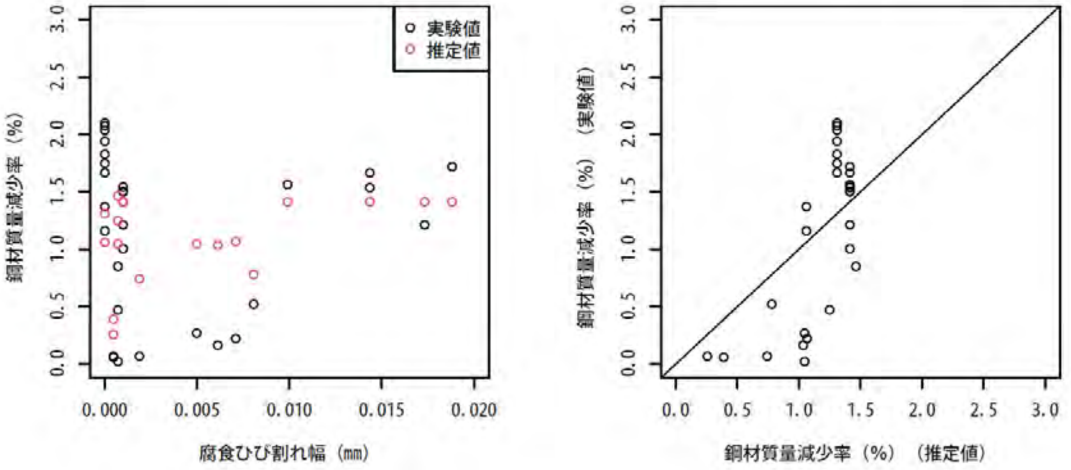


検討ケース 6

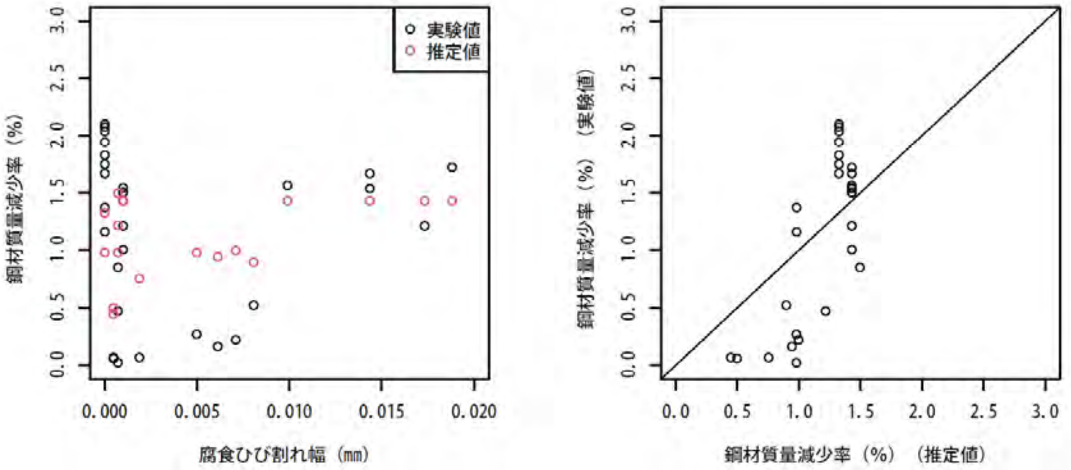
図 3-5(2) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果



検討ケース 7

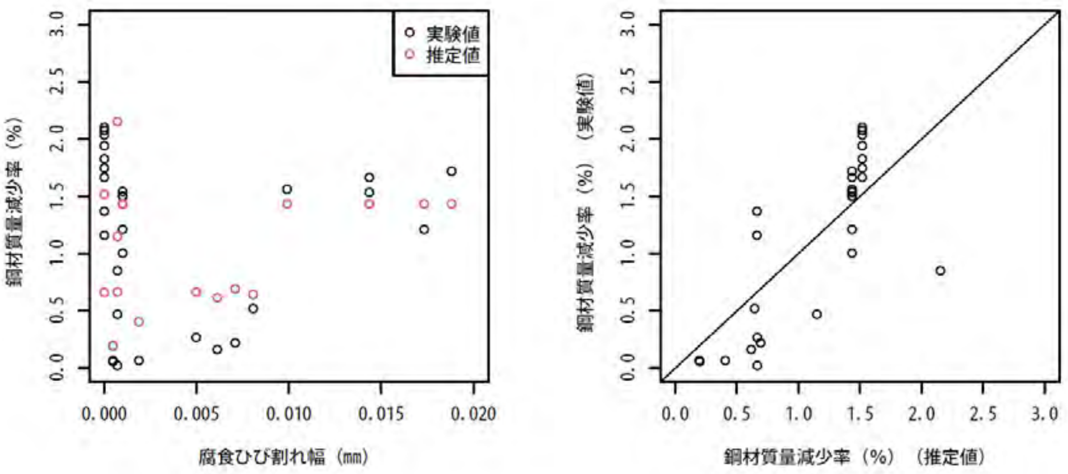


検討ケース 8

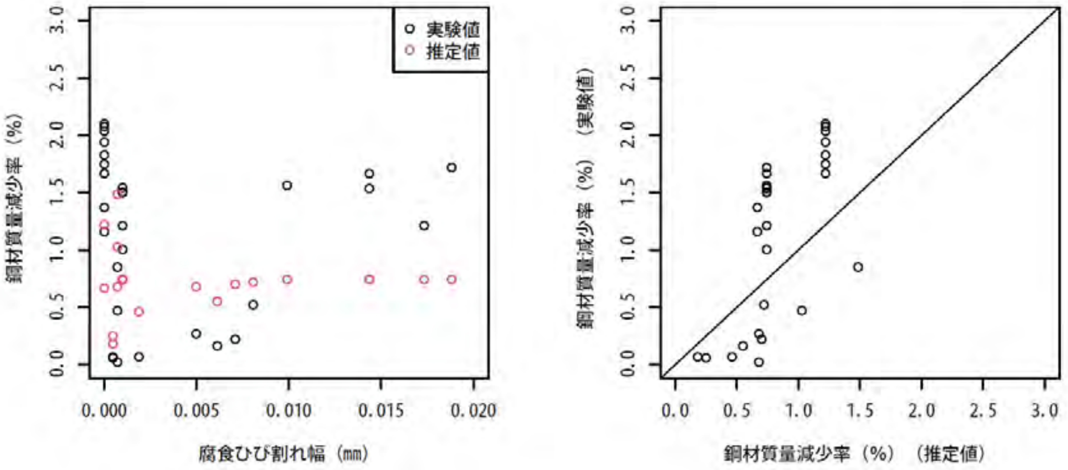


検討ケース 9

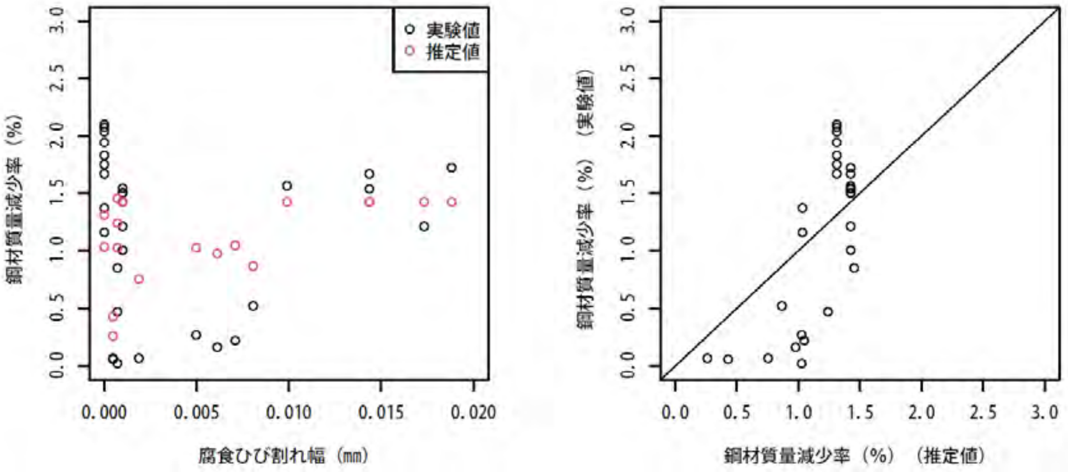
図 3-5(3) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果



検討ケース 10

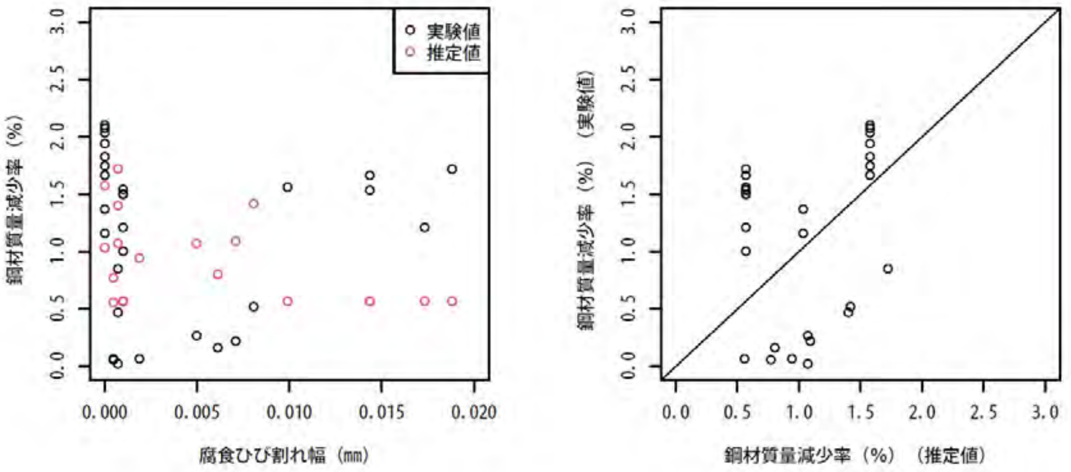


検討ケース 11

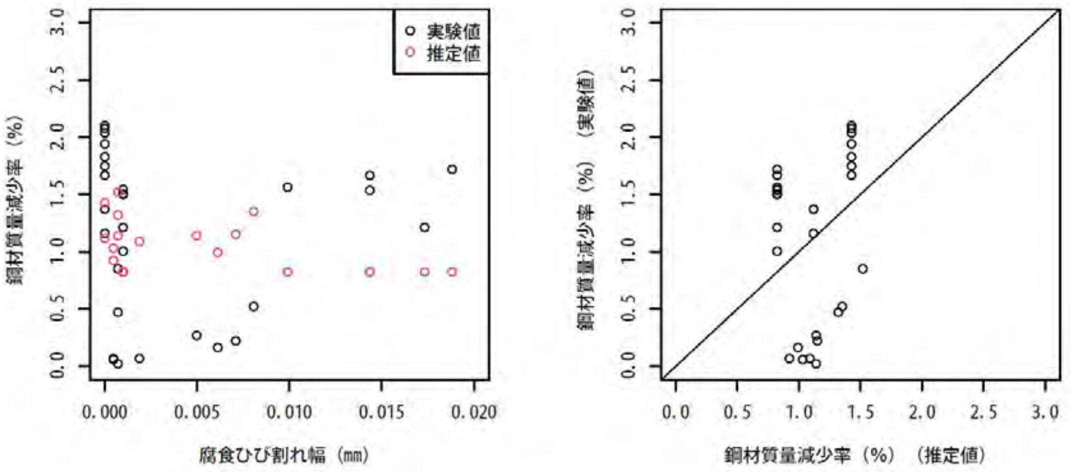


検討ケース 12

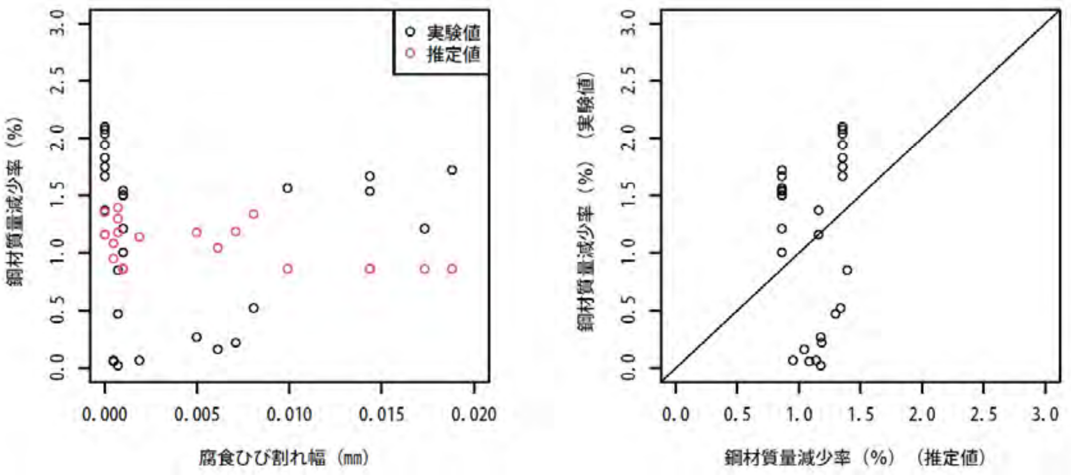
図 3-5(4) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果



検討ケース 13

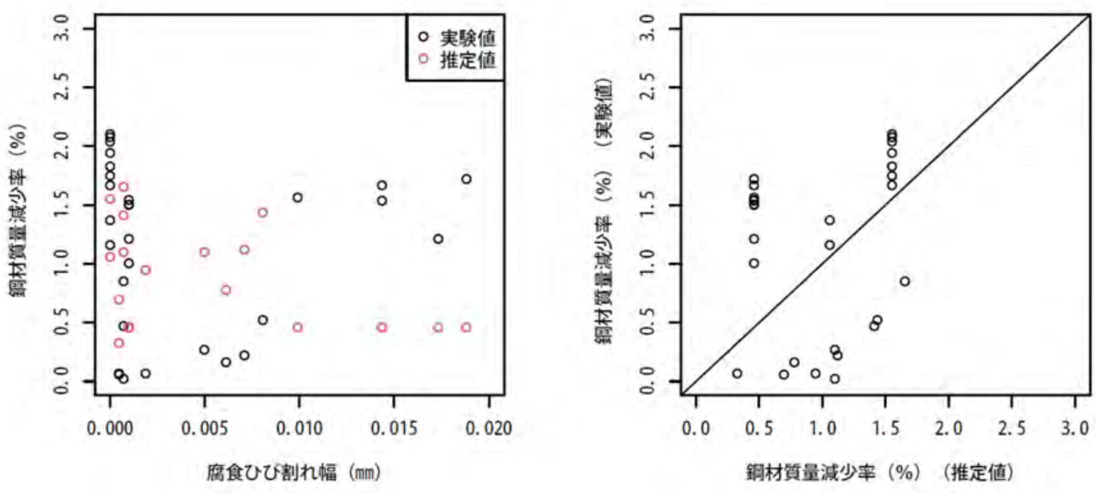


検討ケース 14



検討ケース 15

図 3-5(5) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果



検討ケース 16

図 3-5(6) 腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率モデルの分析結果

3.3.3 コンクリート強度の推定式への反映

鋼材質量減少率を腐食ひび割れ幅 x，純かぶり c および鉄筋径 ϕ を説明変数として推定した形状 I に，コンクリート強度 f'_c を考慮するための検討を行った．形状 I を示した式(3.1)に，3.3.2 の検討で得られた式(3.5)を加えると式(3.6)になる．

$$y = \alpha_1 exp(\alpha_2 c/\phi)x + \alpha_3 exp(\alpha_4 f'_c) \cdot (c/\phi)^{\alpha_5} \tag{3.6}$$

ここに，y：鋼材質量減少率（%）
α_1~α_5：回帰係数
x：腐食ひび割れ幅（mm）
f'_c：コンクリート強度（N/mm^2）
c　：純かぶり（mm）
ϕ　：鉄筋径（mm）

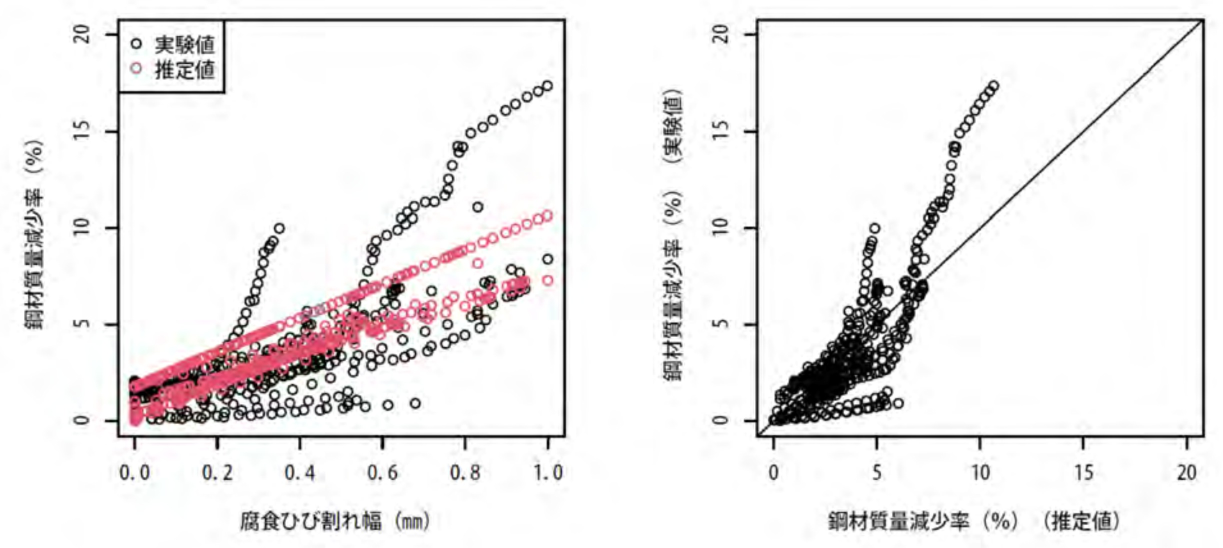
式(3.6)の第 1 項にコンクリート強度 f'_c の影響を反映させるために，第 1 項に f'_c の関数を乗ずることにした．f'_c の関数には，値をそのまま用いる場合と指数関数，対数関数およびべき関数を考えた．検討モデルは表 3-4 に示す 4 ケースである．3.2 で用いた 381 データに対する各モデルの適合性を重み付き非線形回帰分析により検討した．検討モデルの適合性は重相関係数と AIC により確認した．

表 3-4 に，各モデルの分析結果より求めた重相関係数と AIC を示す．また，各モデルの適合性の分析結果を図 3-6 に示す．各図の左側には，腐食ひび割れ幅に対する鋼材質量減少率の実験値と推定値の関係を示した．黒丸が実験値，赤丸が推定値である．右側には，鋼材質量減少率の推定値と実験値の関係を示した．表 3-4 によれば，いずれのケースも，重相関係数，AIC ともに同程度であった．図 3-6 においてもほとんど相違が見なれない．しかし，検討ケース 1 が他のケースに比べて，若干，重相関係数が大きく，AIC の値が小さい．そこで，以降の検討では，検討ケース 1 のモデルを反映させた式(3.7) に示す推定式を用いて検討を行う．なお，図 3-6 の左側の図を見ると，赤で示した推定値が 2 つのグループに分かれ，あたかも 2 本の線のように見える．これは，対象とした供試体に用いられたコンクリート強度 f'_c に偏りがあり，中間にデータのない領域が存在していたことと，分析結果では腐食ひび割れ発生時の鋼材質量減少率に対して f'_c の影響が大きいために生じたものと考えられる．

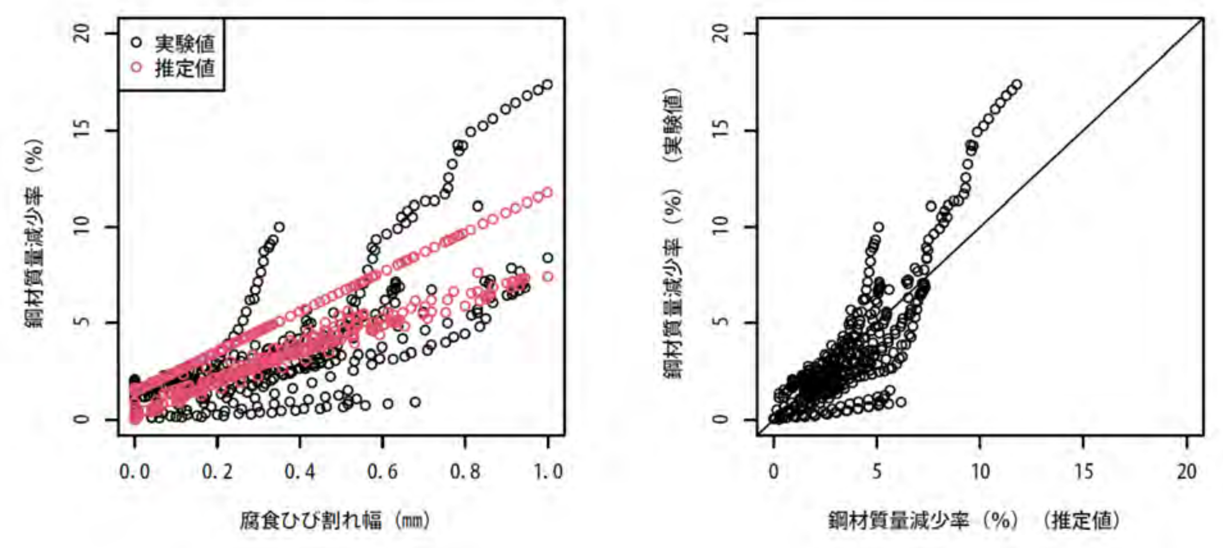
$$y = \alpha_1 exp(\alpha_2 f'_c + \alpha_3 c/\phi)x + \alpha_4 exp(\alpha_5 f'_c) \cdot (c/\phi)^{\alpha_6} \tag{3.7}$$

表 3-4 コンクリート強度を反映したモデルとその適合性

ケース	第 1 項の式	重相関係数	AIC
1	$\alpha_1 \exp(\alpha_2 f'c) \cdot \exp(\alpha_3 (c/\phi))$	0.84	1536
2	$\alpha_1 f'c^{\alpha_2} \cdot \exp(\alpha_3 (c/\phi))$	0.83	1540
3	$\alpha_1 (\ln(f'c)+\alpha_2) \cdot \exp(\alpha_3 (c/\phi))$	0.83	1540
4	$\alpha_1 (f'c+\alpha_2) \cdot \exp(\alpha_3 (c/\phi))$	0.83	1537

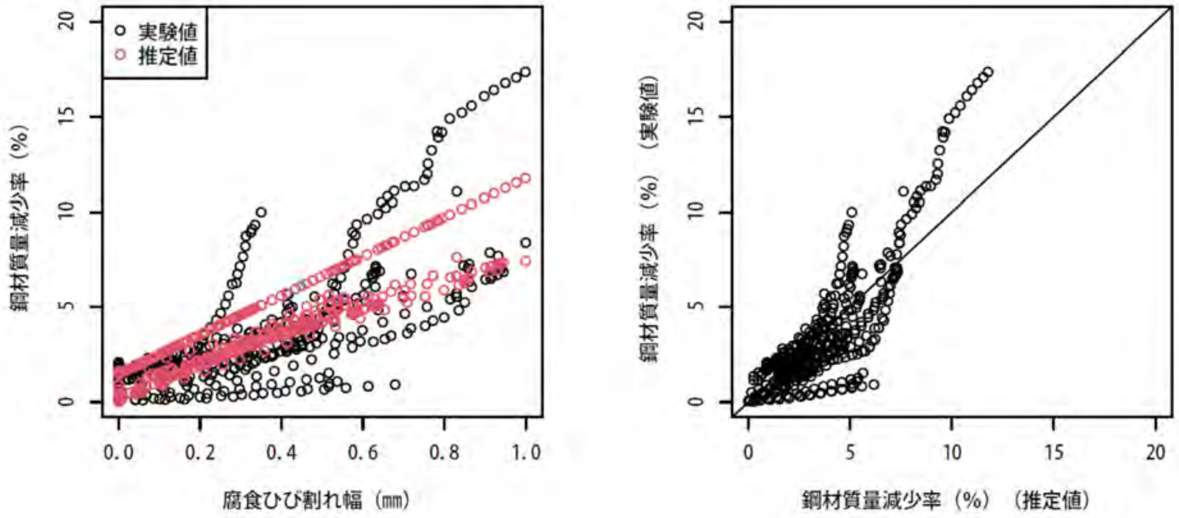


検討ケース 1

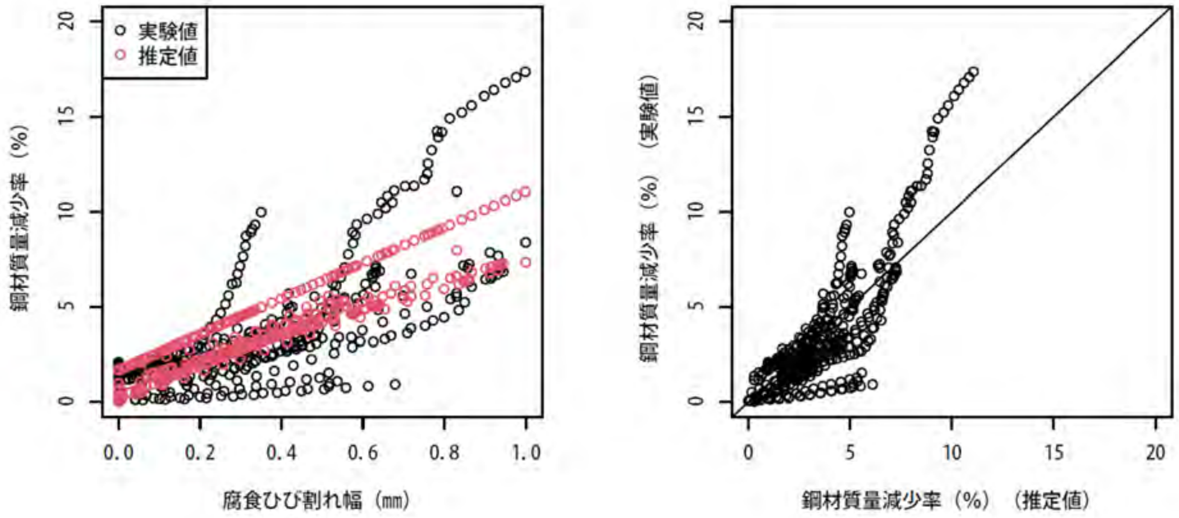


検討ケース 2

図 3-6(1) コンクリート強度を反映したモデルの分析結果



検討ケース 3



検討ケース 4

図 3-6(2) コンクリート強度を反映したモデルの分析結果

3.4 カテゴリーデータを考慮した推定式の検討

3.4.1 対象とするカテゴリーデータ

3.3 の検討では，4 項目のカテゴリーデータの条件を同一にし，抽出されたデータを対象として基本形状の検討を実施した．3.4 では，式(3.7) として示した基本形状を拡張し，3.3 とは異なるカテゴリーデータの条件にも適用可能な推定式の検討を行う．まず検討を行うに当たり，3.3 で同一条件とした腐食方法，鉄筋種類，せん断補強筋の有無および鉄筋配置の 4 項目のカテゴリーデータについて説明変数として採用するか検討した．

腐食方法の相違による傾向について，電食実験と暴露試験の鉄筋腐食量は，暴露試験が電食実験に比べて 2～2.5 倍大きいという報告[8)]がある一方，両者の相違はあまり見られないという報告[9)]もあった．腐食方法の相違を考慮することは，鉄筋腐食量の推定において重要であると考え，分析対象とした．

電食実験の多くは,電流密度で 2mA/cm^{2}以下の電流を流して鉄筋を腐食させている．しかし，中には電流密度で 20mA/cm^2 の電流を流した実験結果もあった．既往の文献では，電流密度が大きい方が腐食ひび割れ幅は同じでも鉄筋腐食量は多くなるとの報告がある[10),11)]．そこで，電食を電食と電食（高電流）に分けて分析することにした．なお，鉄筋腐食実験データベースより抽出したデータで使われている腐食方法は，電食，暴露および乾湿繰り返しの 3 種類であった．

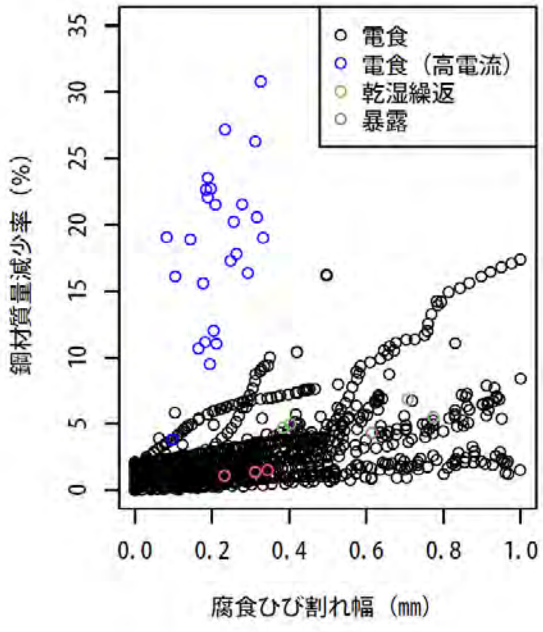
鉄筋種類については，既往の文献において，丸鋼と異形鉄筋では，同じひび割れ幅でも異形鉄筋の腐食量は丸鋼の 2～4 倍程度大きい[12)]，両者の相違はほとんど見られない[8)]，と文献によって異なる傾向が報告されている．鉄筋種類は，鉄筋腐食量の推定上，考慮すべきであると考え，分析対象とした．

せん断補強筋の有無についても，既往の文献において，あまり影響が見られないという報告[13)]と，影響が見られるとの報告[14)]があった．これについても，鉄筋腐食量の推定上，考慮すべきであると考え，分析対象とした．なお，せん断補強筋の有無は，なし，あり，あり(一部)の 3 種類とした．

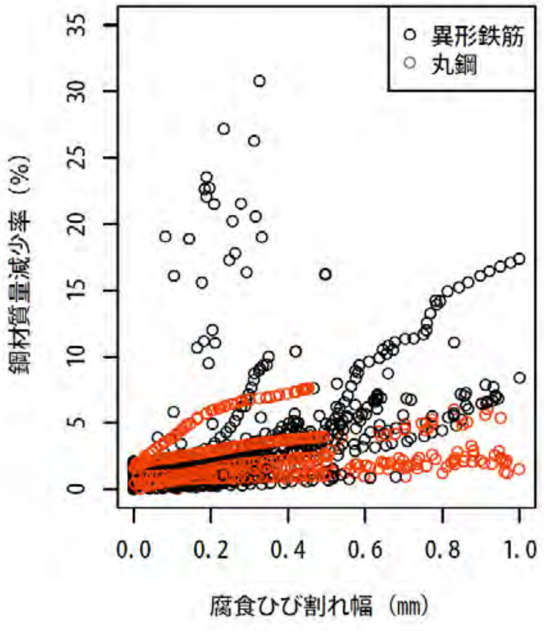
鉄筋配置は，既往の文献では，同じ腐食ひび割れ幅でも，鉄筋が平行に複数本並んでいる場合，鉄筋がコンクリート中に 1 本だけ配置されている場合に比べて鉄筋腐食量は大きくなると報告されている[15),16)]．その理由として，村上ら[15)]は，鉄筋の腐食膨張圧で隣り合う鉄筋の腐食ひび割れ幅が拘束されると述べている．黒田[16)]は，隣り合う鉄筋間で供試体内部に腐食ひび割れが生じ，表面の腐食ひび割れ幅が小さくなると述べている．鉄筋配置も，鉄筋腐食量の推定上，考慮すべきであると考え，分析対象

とした．なお，分析に当たり，鉄筋 1 本の場合をタイプ A，平行に 2 本の鉄筋が並ぶ，片側だけ隣の鉄筋の影響を受ける場合をタイプ B と呼ぶことにする．平行に 3 本の鉄筋が並ぶ，真ん中の鉄筋は両側の鉄筋の影響を受ける場合はタイプ C と呼ぶことにした．鉄筋配置の種類は，タイプ A，B，C および交差の 4 種類である．対象とするカテゴリーデータの種類で色分けした腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係を図 3-7 に示す．

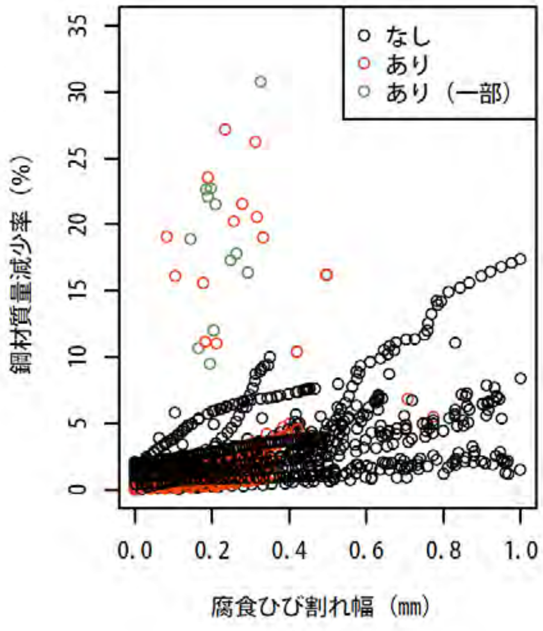
同図によれば，対象としたデータの多くは鋼材質量減少率が 15％以下であるが，一部，腐食ひび割れ幅が 0.5mm 以下でも 15%以上のデータが見られる．それらのデータは，腐食方法が電食（高電流），鉄筋種類は異形鉄筋，せん断補強筋は「あり」または「あり（一部)」，鉄筋配置はタイプ C である．高谷ら [10)]および宇田ら [11)]の指摘を踏まえると，鋼材質量減少率が 10％以上に集中している電食（高電流）の影響が大きいと予想される．



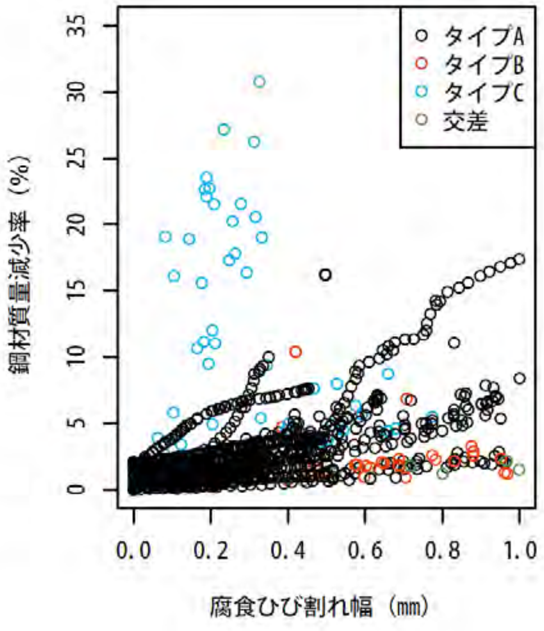
腐食方法



鉄筋種類



せん断補強筋の有無



鉄筋配置

図 3-7 カテゴリーデータで区分した腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係

3.4.2 カテゴリーデータを考慮した非線形回帰分析

3.3 において式(3.7) として示した腐食ひび割れ幅に基づく鋼材質量減少率の基本形状に，各カテゴリーデータに応じた係数を乗ずることで，カテゴリーデータを考慮した鋼材質量減少率を推定するモデルを考えた．式(3.8)にその推定式の形を示す．

$$y = \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\{\alpha_1 exp(\alpha_2 f'_c + \alpha_3 c/\phi) + \alpha_4 exp(\alpha_5 f'_c)\cdot(c/\phi)^{\alpha_6}\} \tag{3.8}$$

ここに，β_1：腐食方法の係数
β_2：鉄筋種類の係数
β_3：せん断補強筋の係数
β_4：鉄筋配置の係数

鉄筋腐食実験データベースより，腐食ひび割れ幅が 1.0mm 以下のデータを抽出し，930 データを対象に重み付き非線形回帰分析を実施した．回帰係数β_1からβ_4は，カテゴリーデータに対してダミー変数を作成し，式(3.8)に組み込んで算定した．各カテゴリーデータの基準は，3.3 のデータ抽出の条件に合わせ，試験方法は電食，鉄筋種類は異形鉄筋，せん断補強筋の有無はせん断補強筋なし，鉄筋配置はタイプ A とした．分析によって得られた推定式を式(3.9)に示す．係数β_1からβ_4は整理して表 3-5 に示す．同表の値は算出結果を小数点第 1 位で丸めた．鉄筋腐食実験データベースより抽出したデータと式(3.9) との重み付き残差二乗和は 1151 となり，推定式の標準偏差 s=3.09 であった．また，抽出データと推定式の適合性は，重相関係数で 0.91 となり，3.2 の検討に用いた形状Ⅳの重相関係数よりも良好となった．

$$y = \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4\{13.70 exp(0.0025 f'_c - 0.237 c/\phi)x + 1.77 exp(-0.0049 f'_c)(c/\phi)^{-0.924}\} \tag{3.9}$$

ここに，β_1～β_4：カテゴリーデータの回帰係数（表 3-5 参照）
y　：鋼材質量減少率（%）
x　：腐食ひび割れ幅（mm）
f'_c　：コンクリート強度（N/mm^2）
c　：かぶり（mm）
ϕ　：鉄筋径（mm）

分析に用いたデータを腐食方法，鉄筋種類およびせん断補強筋の有無で分類すると表 3-6 に示すように 6 グループに分けられた．図 3-8 に鋼材質量減少率の推定値をグ

ループごとに色分けした図を示す．同図により表 3-5 に示したβ_1からβ_4の係数の影響を確認する．グループ 1 とグループ 2 を比較すると，異形鉄筋よりも丸鋼の方が同じ腐食ひび割れ幅でも鋼材質量減少率が小さい傾向が見られる．グループ 1 とグループ 3 を比較すると，せん断補強筋ありはせん断補強筋なしに比べて鋼材質量減少率が大きくなる傾向が見られる．グループ 4 は，電食（高電流）とせん断補強筋ありの影響で他のグループよりかなり鋼材質量減少率が大きくなっている．グループ 5 およびグループ 6 の鋼材質量減少率は，グループ 1 の鋼材質量減少率の範囲内であった． 図 3-9 にカテゴリーデータを考慮した鋼材質量減少率の推定値と実験値との関係を示す．上段の図は腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係，下段の図は，横軸に鋼材質量減少率の予測値を，縦軸に実験値を示したものである．上段の図によれば，推定式が実験値の腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係を概ね表現できていることが確認できる．下段の図では，実験値の鋼材質量減少率に対する推定式のばらつきは，鋼材質量減少率の大きさによる違いがあまり見られない．推定式のばらつきは標準偏差一定の傾向を有していることが確認できる．

表 3-5 回帰係数β_1からβ_4の値

腐食方法の係数β_1	電食	1.0
	電食（高電流）	2.5
	乾湿繰り返し	0.3
	暴露	0.6
鉄筋種類の係数β_2	異形鉄筋	1.0
	丸鋼	0.5
せん断補強筋の有無の係数β_3	なし	1.0
	あり	2.4
	あり（一部）	2.4
鉄筋配置の係数β_4	タイプA	1.0
	タイプB	1.1
	タイプC	1.1
	交差	0.4

表 3-6 カテゴリーデータによるグループ分け

グループ	腐食方法	鉄筋種類	せん断補強筋の有無
1	電食	異形鉄筋	なし
2	電食	丸鋼	なし
3	電食	異形鉄筋	あり
4	電食(高電流)	異形鉄筋	あり
5	乾湿繰り返し	異形鉄筋	あり
6	暴露	異形鉄筋	なし

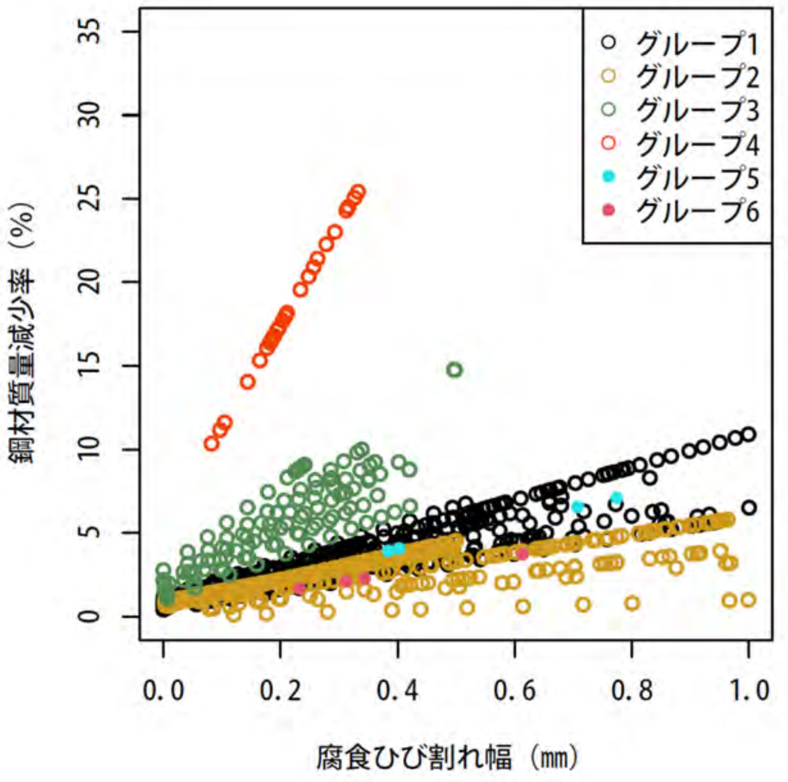
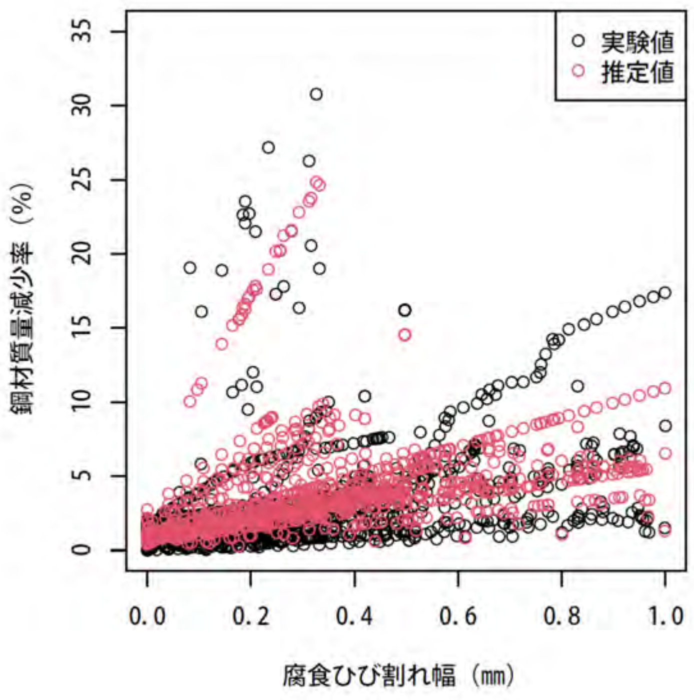
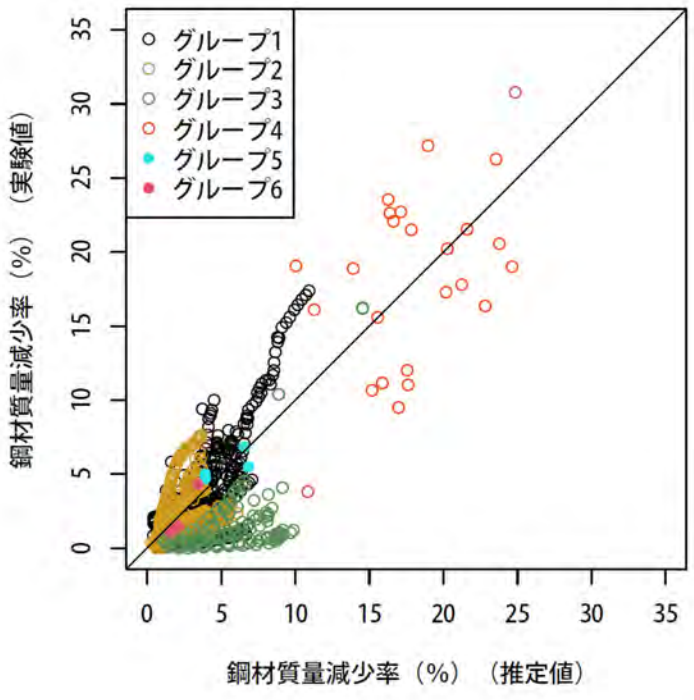


図 3-8 グループで区分した鋼材質量減少率の推定値



腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係



鋼材質量減少率の推定値と実験値の関係

図 3-9 カテゴリーデータを考慮した鋼材質量減少率の推定値と実験値の関係

3.5　まとめ

本章では，多くの鉄筋腐食実験データを収集して作成した鉄筋腐食データベースを用いて，腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式について検討した．そして，鉄筋径，鉄筋かぶりおよびコンクリート強度などを考慮するとともに，鉄筋種類，せん断補強筋の有無および鉄筋腐食条件等のカテゴリーデータにも対応した推定式を提案した．また，信頼性手法の枠組みで推定式を用いることを踏まえ，提案式のばらつきについて分析した．

1) 既往の文献調査で提案されている腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式を参考に 4 種類の推定式の形状を考え，鉄筋腐食実験データベースを用いて適合性を確認した．その結果，いずれの形状も推定値と実験値の相関は高く，比較的良好な推定を行うことができた．

2) カテゴリーデータを考慮した推定式が複雑にならないように，4 種類の推定式の形状から回帰係数の少ない形状 I を選定し，適合性を向上させるための改良を図った．形状 I に腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量とコンクリートの圧縮強度の影響を考慮することにより，推定式の適合性が向上した．改良した形状 I を推定式の基本形状とした．

3) 推定式の基本形状を拡張して，カテゴリーデータを考慮した非線形重回帰分析を実施した．作成した推定式を用いることにより，電食実験と暴露試験，異形鉄筋と丸鋼等の相違を考慮できるようになり，既往の推定式と比較して様々な条件に対して定量的な鉄筋腐食量の推定が可能となった．推定式のばらつきは，標準偏差でおよそ 3%であった．また，検討に用いたデータに対する推定式の適合性は，重相関係数で 0.91 であった．

参考文献（第 3 章）

1) 岸雅之，森川英典，大山真一：鉄筋腐食劣化を考慮した RC 部材の性能評価の評点化手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1171-1176，2001.
2) 亓路寛，関博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集，No.669，pp.161-171，　2001.
3) 橘高義典，小安健太，松沢晃一，刈田祥彦：X 線撮影により得られる鉄筋腐食減

量とコンクリートの表面ひび割れとの関係について,コンクリート工学年次論文集, Vol.38，No.1，pp.1131-1136，2016.

4) 篠原保二，丸山裕生，山下海斗，南正樹：腐食鉄筋によるひび割れ発生前後の腐食挙動およびひび割れ進展, 日本建築学会構造系論文集 No.728, pp.1609-1618, 2016.

5) 日本コンクリート工学会：ひび割れ調査，補修・補強指針-2013-，2013.

6) 小西貞則，北川源四郎：情報量規準，朝倉書店，2004.

7) 田森清美，丸山久一，橋本親典，小田川昌史：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510，1988.

8) 西澤彩，高谷哲，中村士郎，宮川豊章：腐食性生成物の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol35, No1, pp1051-1056, 2013.

9) 濱田宏，丸山久一，下村匠，青山敏幸：腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.811-816，1997.

10) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.

11) 宇田好一郎，HUSSEIN Nour-Allah，Louis Darmawan，佐藤良一：腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートプリズムの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26，No.2，pp.841-846，2004.

12) 武若耕司，松本進：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響，第 6 回コンクリート工学年次論文集，pp.177-180，1984.

13) 松島学，横田優，関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004.

14) 刈谷潤貴，高木大地，村上祐貴：腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧が鉄筋腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1174-1179，2014.

15) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食したＲＣ梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究, 土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.631-649，2008.

16) 黒田一郎：複数の腐食鉄筋を有する RC 梁部材の非破壊検査による鉄筋断面積減少率と曲げ耐力の推定方法，コンクリート工学論文集，第 27 巻，pp.43-55，2016.

第4章 鉄筋腐食量の空間分布推定

4.1 はじめに

第 3 章において腐食ひび割れ幅等に基づく鉄筋腐食量の推定式を設定した．本章では腐食ひび割れ幅から既設 RC 構造物の現状評価を行うために，第 3 章の推定式を用いて腐食ひび割れ幅の空間分布より鋼材質量減少率の空間分布を推定する方法について検討した．

空間分布の推定に用いる手法は，第 2 章の既往の文献調査を踏まえて，現在，機械学習のアルゴリズムの一つとして注目されているガウス過程回帰（Gaussian Process Regression，以降では GPR と記す）を用いることにした [1),2)]．腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の空間分布情報が詳細に得られている既往の実験データに対して，GPR を用いた富澤らの研究 [3)]を参考にして鋼材質量減少率の空間分布推定を行い，その適用性について検討した．

4.2 GPR を用いた異種特性値の空間分布推定手法の定式化

GPR を用いて鋼材質量減少率の空間分布推定手法を行うにあたり，GPR の理論概要を示す．富澤らは GPR をベイズ推定に基づく線形逆問題の特殊な場合との考えに基づいて，線形逆問題より GPR の誘導を図っている．以下に，富澤らの論文より GPR の誘導過程を示す [3)]．

推定したい未知量ベクトル $\boldsymbol{x}$ の事前情報

$$\boldsymbol{x}=\bar{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{w} \tag{4.1}$$

$\bar{\boldsymbol{x}}$：平均値ベクトル

$\boldsymbol{w}$：事前情報の不確定性を表す確率変数ベクトル

一方，観測方程式は式（4.2）で表されるとする．

$$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{v} \tag{4.2}$$

$\boldsymbol{z}$：観測量ベクトル

$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})$：非線形も含む関数

$\boldsymbol{v}$：観測量誤差

$\boldsymbol{w}$，$\boldsymbol{v}$ は平均 0 の正規分布に従い，共分散行列がそれぞれ $\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{R}$ で与えられ，互いに独立とする. すると, 事前情報の不確定性 $\boldsymbol{w}$ は多変量正規分布 $N(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{M})$で与えられる. 未知量 $\boldsymbol{x}$ の最適な推定値は観測量 $\boldsymbol{z}$ が与えられたときの事後の確率分布（条件付確率）$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{z})$を最大にするときの値とする. 事後の確率分布を最大化することから MAP（Maximum A Posterion）とも呼ばれている.

$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{z})$の式から未知量 $\boldsymbol{x}$ に関連する項を抜き出すと，$p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{z})$を最大にする $\boldsymbol{x}$ は，以下に示す目的関数 $\boldsymbol{J}$ を最小化する最適化問題と等しい [4].

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{x} - \bar{\mathrm{x}})^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{x} - \bar{\mathrm{x}}) + \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{z} - \boldsymbol{H}(x)\right)^T R^{-1}\left(\boldsymbol{z} - \boldsymbol{H}(x)\right) \tag{4.3}$$

式(4.3)の非線形関数 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})$が線形関数 $\boldsymbol{Hx}$ に置き換えられた場合，式(4.3)の目的関数 $\boldsymbol{J}$ の最小値は，$\boldsymbol{x}$ に関する $\boldsymbol{J}$ の導関数，式(4.4)を用いて求めることができる.

$$\frac{\boldsymbol{dJ}}{\boldsymbol{dx}} = \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{x} - \bar{\mathrm{x}}) - \boldsymbol{H}^T\boldsymbol{R}^{-1}(\boldsymbol{z} - \boldsymbol{Hx}) = \boldsymbol{0} \tag{4.4}$$

これを解くことで式(4.5)および式(4.6)に示す平均ベクトルと事後の共分散行列を得ることができる.

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \bar{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{PH}^T\boldsymbol{R}^{-1}(\boldsymbol{z} - \boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{x}}) \tag{4.5}$$

$$\boldsymbol{P} = \left(\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}^{-1}\right)^{-1} \tag{4.6}$$

これらは，カルマンフィルターのアルゴリズムのカルマンゲイン $\boldsymbol{K}_{\mathrm{G}}$ を用いて書き直すことができる [5].

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \bar{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}_G(\boldsymbol{z} - \boldsymbol{H}\bar{\mathrm{x}}) \tag{4.7}$$

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{M} - \boldsymbol{K}_G\boldsymbol{HM} \tag{4.8}$$

$$\boldsymbol{K}_G = \boldsymbol{MH}^T\left(\boldsymbol{HMH}^T + \boldsymbol{R}\right)^{-1} \tag{4.9}$$

式(4.7)および式(4.8)はそれぞれ数学的に式(4.5)および式(4.6)と同値である.

GPR も上記目的関数の最小化から誘導することができる. いくつかの点で物性値が観測されているとき，その物性値の空間分布の推定を行う問題を考える. その際，観測された値にも誤差が含まれているとする. 観測点，推定点における物性値のベクトルをそれぞれ $\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2$，未知量の物性値ベクトルを $\boldsymbol{x}$ とする. 本検討での $\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2$ はそれぞれ腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率である.

$$\boldsymbol{x}^T = \left\{\boldsymbol{x}_1^T, \boldsymbol{x}_2^T\right\} \tag{4.10}$$

式(4.2)の観測方程式を以下のように定義する.

$$\boldsymbol{z} = \boldsymbol{Hx} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\boldsymbol{x}_1 \\ \boldsymbol{x}_2\end{Bmatrix} + \boldsymbol{v} \tag{4.11}$$

ここで，I は単位行列である．未知量ベクトルの事前情報の共分散行列を式(4.12)に示すように 4 つに分けて考える

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{11} & \boldsymbol{M}_{12} \\ \boldsymbol{M}_{12}^T & \boldsymbol{M}_{22} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

ここで，$M_{ij}=E\left[(x_i-\overline{x_i})(x_j-\overline{x_j})^T\right]$ である．式(4.11)および式(4.12)を式(4.7)から式(4.9)に代入すると式(4.13)から式(4.15)が得られる．

$$\begin{Bmatrix} \hat{\boldsymbol{x}}_1 \\ \hat{\boldsymbol{x}}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{\boldsymbol{x}}_1 \\ \overline{\boldsymbol{x}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{11} \\ \boldsymbol{M}_{12}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} [\boldsymbol{M}_{11} + \boldsymbol{R}]^{-1} \{\boldsymbol{z} - \overline{\boldsymbol{x}}_1\} \tag{4.13}$$

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{11} & \boldsymbol{P}_{12} \\ \boldsymbol{P}_{12}^T & \boldsymbol{P}_{22} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

$$\boldsymbol{P}_{ij} = \boldsymbol{M}_{ij} - \boldsymbol{M}_{i1}(\boldsymbol{M}_{11} + \boldsymbol{R})^{-1}\boldsymbol{M}_{1j} \tag{4.15}$$

本検討では，式(4.13)の $\bar{x}_2$（鋼材質量減少率の平均値ベクトル）の算定には 3 章で設定した腐食ひび割れ幅に基づく鋼材質量減少率の推定式(3.9)を用いる．なお，推定式の各設計変数は 4.3 で後述する実験データの条件に従う．

観測量誤差をホワイトノイズと仮定すると $\boldsymbol{R}$ は一定の大きさの成分の対角行列となる．式(4.15)を用いて推定点同士の事後共分散行列 P_{22} を求めることができる．その対角成分の平方根が推定値の標準偏差である．これに基づき 95%信頼区間（推定値±1.96×推定値の標準偏差）を算出できる．共分散値 cov は式(4.16)より算出する．同式は異種特性も含めた任意の 2 点間の共分散の算定式となっている．

$$\mathrm{cov}_{k_1,k_2}(d) = \sigma_{k_1}\sigma_{k_2}\mathrm{cor}_{k_1,k_2}\sqrt{\rho_{k_1}(d\,|\,\delta_{k_1})\rho_{k_2}(d\,|\,\delta_{k_2})} \tag{4.16}$$

ここに，k_1：腐食ひび割れ幅
k_2：鋼材質量減少率
σ_{k1}：腐食ひび割れ幅の確率場の標準偏差
σ_{k2}：鋼材質量減少率の確率場の標準偏差
$cor_{k1,k2}$：腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率間の相関係数
$\rho_{k_1}(d|\delta_{k_1})$：腐食ひび割れ幅の自己相関関数
$\rho_{k_2}(d|\delta_{k_2})$：鋼材質量減少率の自己相関係数
d：2 点間距離

自己相関関数は地盤工学分野では表 4-1 に示すように Markovian（single exponential）モデルと Gaussian（squared exponential）モデルが良く使用され，使用実績の約 7 割を

占めるようである[6]．4.5.2 では相互相関を求めるに当たり，関数形を用いた場合と用いない場合の検討を実施する．関数形を用いる際には Markovian および Gaussian の 2 つのモデルを用いることとする．式(4.17)および式(4.18)に 2 つのモデル式を示す．なお，両式で用いている δ は Scale of Fluctuation（SOF）である（表 4-1 では θ と表記されている）．SOF は自己相関係数の積分値として定義され，相関距離を基準化したパラメータである．

Markovian（single exponential）

$$k(d|\delta) = exp\left(-2\frac{d}{\delta}\right) \tag{4.17}$$

Gaussian（squared exponential）

$$k(d|\delta) = exp\left(-\pi\left(\frac{d}{\delta}\right)^2\right) \tag{4.18}$$

自己相関関数において必要となる確率場の標準偏差や SOF の推定には最尤法を用いる．式(4.19)に示す負の対数尤度を最小化するように最適化手法である BFGS 法を用いてパラメータ推定を行う．尤度は観測値とモデルの当てはまりを表し，尤度を最大にするモデルパラメータは最尤推定値と呼ばれる．正規分布を仮定する場合，負の対数尤度は残差二乗和に相当する項が誘導される．

$$-ln\mathrm{L} = \frac{1}{2}\{\boldsymbol{z}-\bar{\boldsymbol{x}}_1\}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{M}_{11}+\boldsymbol{R}]\{\boldsymbol{z}-\bar{\boldsymbol{x}}_1\} + \frac{1}{2}ln|\boldsymbol{M}_{11}+\boldsymbol{R}| + \frac{m}{2}ln(2\pi) \tag{4.19}$$

ここに，m：データ数

表 4-1 自己相関関数モデルの地盤工学分野での使用頻度[6]

Autocorrelation model	Correlation as a function of lag τ	ν	Frequency of usage (%)
Markovian (single exponential)	$\rho(\tau)=\exp\left\{\frac{-2\|\tau\|}{\theta}\right\}$	0.5	48
Second-order Markov	$\rho(\tau)=\left(1+4\frac{\|\tau\|}{\theta}\right)\exp\left\{-4\frac{\|\tau\|}{\theta}\right\}$	1.5	5
Third-order Markov	$\rho(\tau)=\left(1+\frac{16}{3}\frac{\|\tau\|}{\theta}+\frac{256}{27}\left(\frac{\|\tau\|}{\theta}\right)^2\right)\exp\left\{-\frac{16}{3}\frac{\|\tau\|}{\theta}\right\}$	2.5	New to geotechnical practice
Gaussian (squared exponential)	$\rho(\tau)=\exp\left\{-\pi\left(\frac{\|\tau\|}{\theta}\right)^2\right\}$	∞	19
Spherical	$\rho(\tau)=\begin{cases}\frac{4}{3}-2\left\|\frac{\tau}{\theta}\right\|+\frac{2}{3}\left\|\frac{\tau}{\theta}\right\|^3, & \text{if } \|\tau\|\le\theta;\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}$	—	7
Cosine exponential	$\rho(\tau)=\exp\left\{-\frac{\|\tau\|}{\theta}\right\}\cos\left\{\frac{\|\tau\|}{\theta}\right\}$	—	8
Binary noise	$\rho(\tau)=\begin{cases}1-\|\tau\|/\theta, & \text{if } \|\tau\|\le\theta\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}$	—	12
Whittle–Matérn	$\rho(\tau)=\frac{2}{\Gamma(\nu)}\left\{\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+0.5)\|\tau\|}{\Gamma(\nu)\theta}\right\}^{\nu}K_{\nu}\left\{\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+0.5)\|\tau\|}{\Gamma(\nu)\theta}\right\}$	—	—

4.3 本検討で使用する実験データ

4.3.1　実験概要

村上ら[8)]は，電食により鉄筋を腐食させた RC 梁供試体を用いて曲げ載荷試験を行い，鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力について研究を実施した．供試体は，設計基準強度を 30N/mm^2 とし，表 4-2 に示す配合のコンクリートを使用している．練り混ぜ水は，鉄筋腐食を促進させるため 5%NaCl 水溶液を用いている．研究で作成された供試体のうち本検討のデータとして用いた 18 供試体の形状および配筋状態を表 4-3 および図 4-1 に示す．いずれの供試体も，供試体形状は 240×200×2100mm であり，主鉄筋には異形鉄筋 D16(SD295A)を 60mm 間隔に 3 本配置している．この 3 本の主鉄筋は，中央の鉄筋を M 鉄筋，左右の鉄筋は L および R 鉄筋と名付けられている．主鉄筋の下面からのかぶりは 40mm，側面からのかぶりは 60mm である．また，せん断補強筋は，端部のみに配置しているケースと全部材長に渡って配置されているケースがあるが，いずれも D6（SD295A）を使用している．

鉄筋を腐食させるための電食試験法は，図 4-2 に示すように NaCl 水溶液を満たした水槽内に供試体を設置し，主鉄筋を陽極側，銅板を陰極側に接続して直流電流 20A を通電した．主鉄筋の目標腐食率を 5，10，20 および 30%とし，予備実験で得られた知見をもとに，腐食量を積算電流量で制御している．

4.3.2　測定方法および測定結果

鉄筋腐食の評価として，供試体作成前に計測した鉄筋質量と曲げ載荷試験後に計測した鉄筋質量の質量差を試験体作成前の鉄筋質量で除して求めた鋼材質量減少率を用いている．曲げ載荷試験後の計測は，主鉄筋を試験体からはつり出し，20℃の 10%クエン酸第二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬させ，腐食生成物を除去した．そして，主鉄筋を 50mm 間隔で切断し，切断した個々の鉄筋片の質量を測定し，50mm 区間毎の鋼材質量減少率を求めている．一方，腐食ひび割れ幅は，1 つの鉄筋片に対して 2 個所でデータが得られるように,曲げ載荷試験前にクラックスケールを用いて測定した．その平均値を鉄筋片に対する腐食ひび割れ幅の値としている．図 4-3 は，以上のようにして得られた鋼材質量減少率と腐食ひび割れ幅の測定位置を示したものである．1 本の鉄筋に対して 42 箇所,供試体全体では 42 箇所×3 本=126 箇所で測定が行われた．

図 4-4 に，各供試体に対する腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定結果を示す．同図に示す腐食ひび割れ幅は，供試体の各断面に生じた腐食ひび割れ幅の合計を腐食ひび割れ本数で除したものである．鋼材質量減少率は各断面における 3 本の鉄筋の平

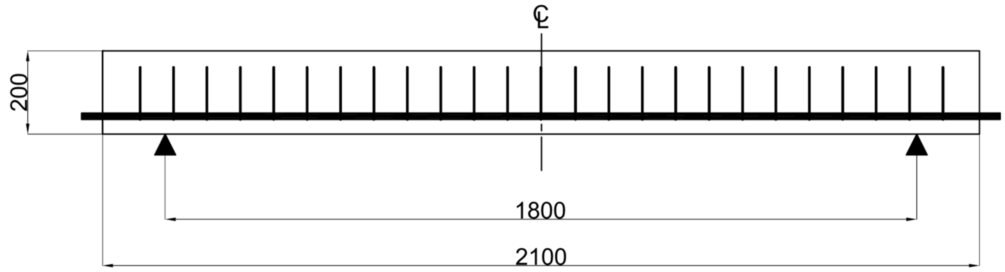
均質量減少率である．測定した結果を確認すると，表 4-3 に示した目標鋼材質量減少率が 5 および 10%である供試体 No.1，9，11 および 13 は，他の供試体に比べて鋼材質量減少率が小さく，また，腐食ひび割れ幅も小さい傾向が見られる．鋼材質量減少率の最大値は 57%で，目標質量減少率が 30%の供試体 No.12 で生じていた．一方，腐食ひび割れ幅の最大は 0.78mm で，供試体 No.3 で生じていた．ちなみに，供試体 No.3 は目標質量減少率 20%の供試体である．

表 4-2 コンクリート配合

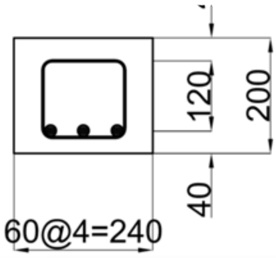
Gmax	W/C	SL	Air	単位量　(kfg/m^3)					
(mm)	(%)	(cm)	(%)	W	C	S	G	混和剤	NaCl
30	60	10	5.0	168	280	826	996	2.8	8.8

表 4-3 検討に用いた供試体一覧表

NO	せん断筋 ＆定着筋	目標鋼材質量 減少率	圧縮強度 (N/mm^2)
1	80ｍｍ	5	29.6
2	80ｍｍ	10	26.5
3	80ｍｍ	20	27.2
4	80ｍｍ	30	26.7
5	80ｍｍ	20	33.3
6	なし	20	25.7
7	240mm	20	30.8
8	240mm	20	32.9
9	定着筋2本	10	28.9
10	定着筋2本	20	28.0
11	定着筋2本	10	30.4
12	定着筋2本	30	27.6
13	定着筋2本	10	31.6
14	定着筋2本	20	28.0
15	定着筋4本	20	28.7
16	定着筋4本	20	30.0
17	定着筋2本	20	32.9
18	240mm	20	32.4

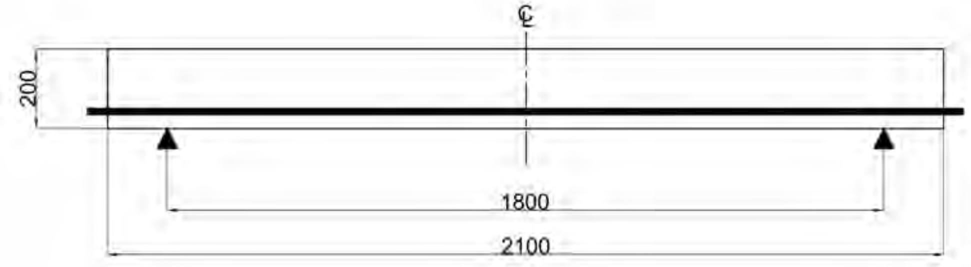


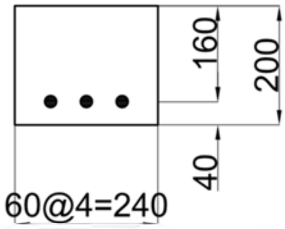
側面図



断面図

供試体 No.1,2,3,4,5

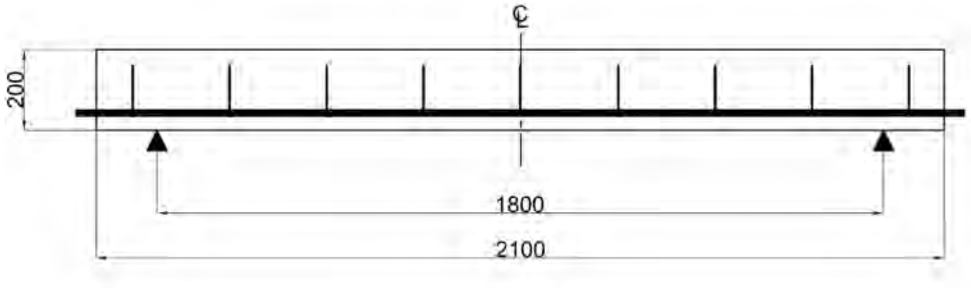




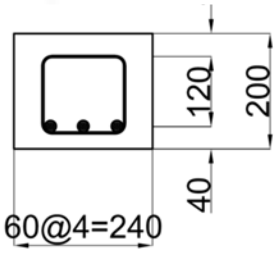
側面図

断面図

供試体 No.6



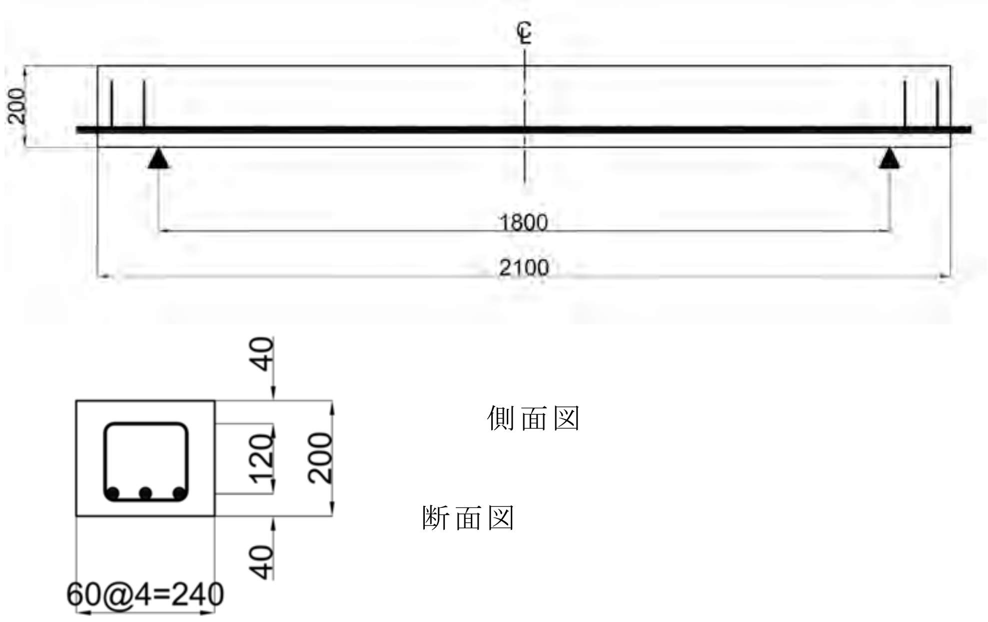
側面図



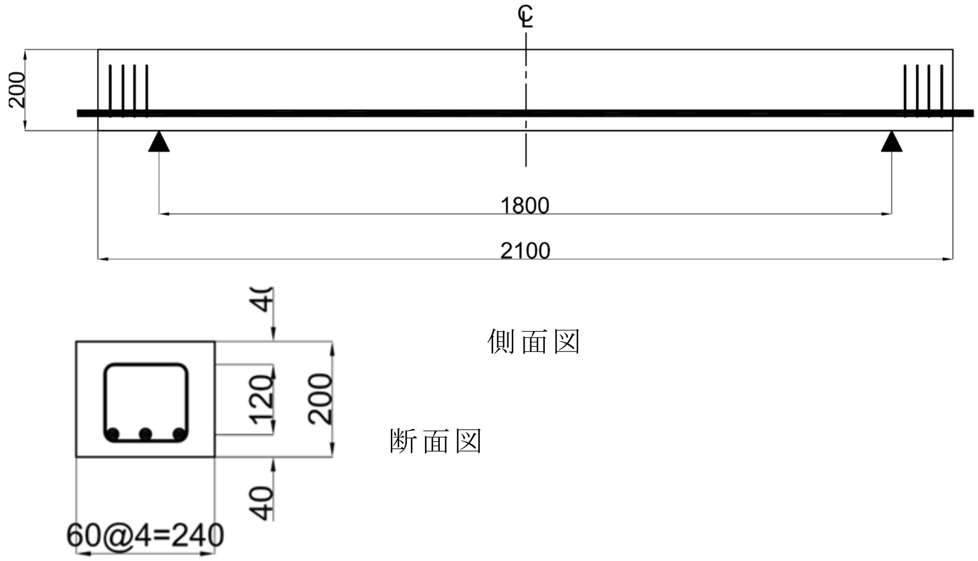
断面図

供試体 No.7,8,18

図 4-1(1) 供試体形状よび配筋



供試体 No.9,10,11,12,13,14,17



供試体 No.15,16

図 4-1(2) 供試体形状よび配筋

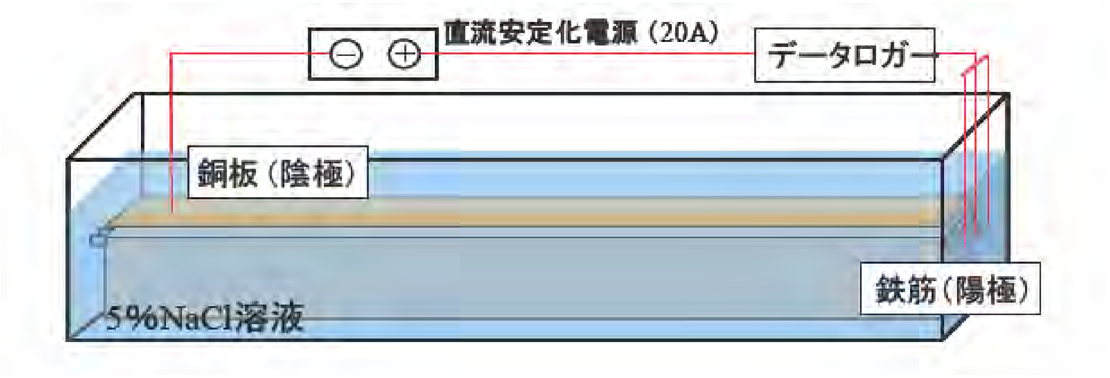


図 4-2 電食実験概要

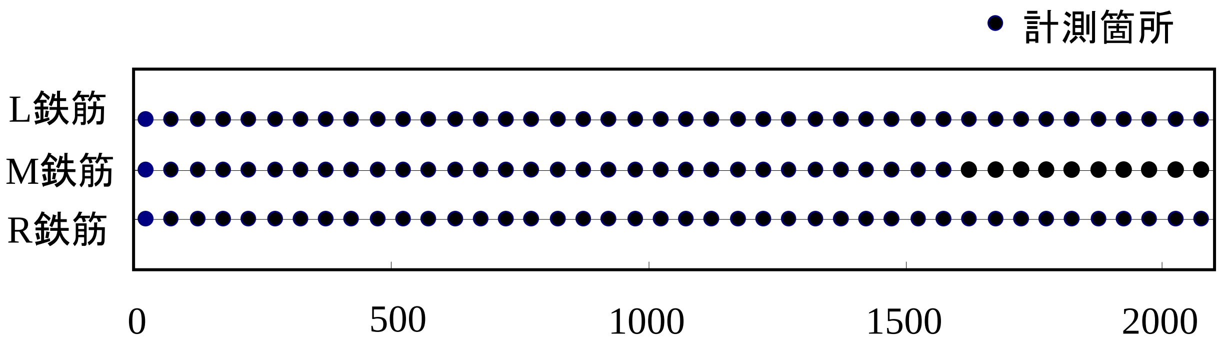
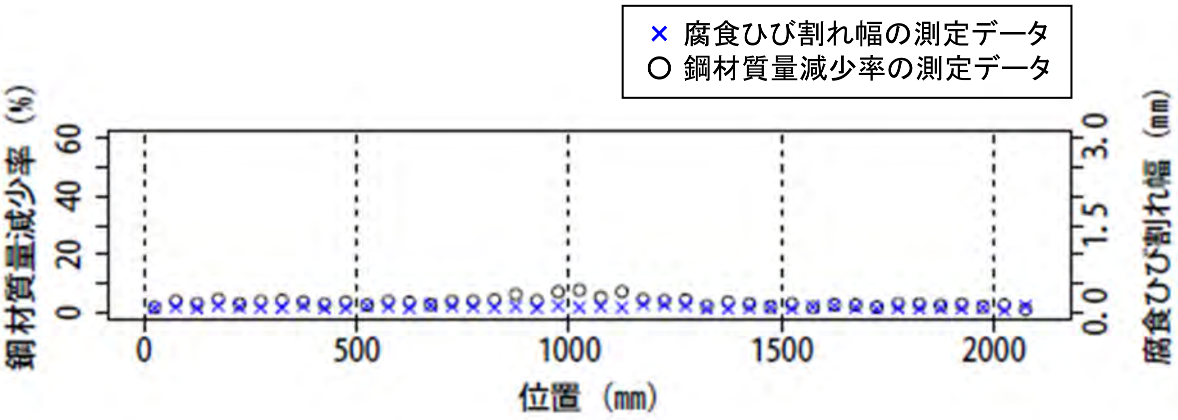
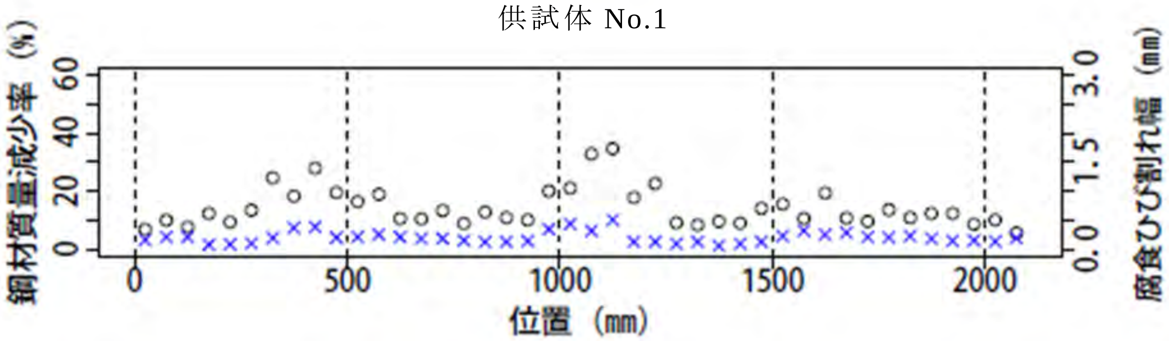


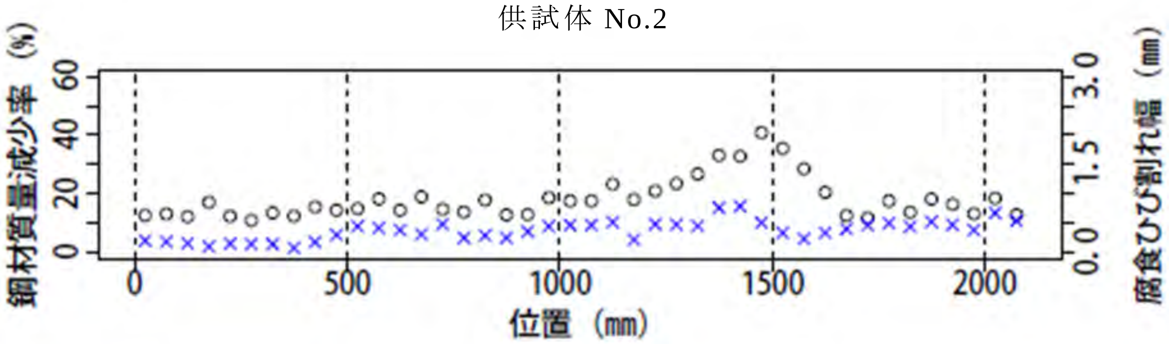
図 4-3 測定位置図



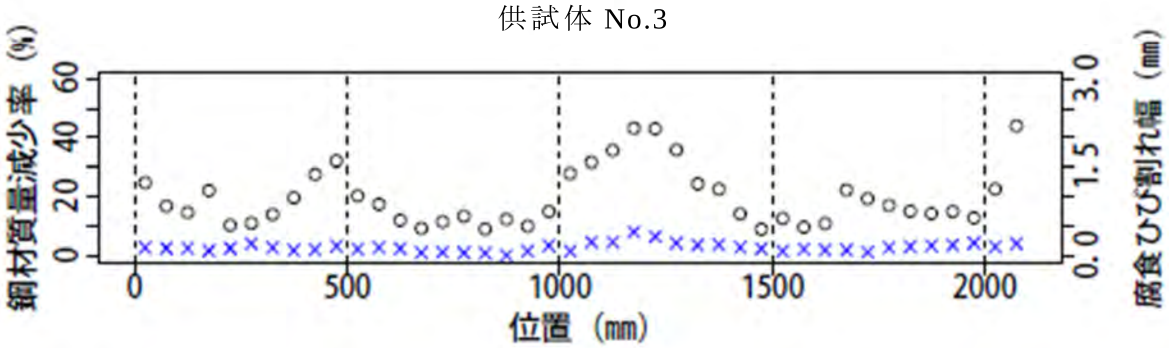
供試体 No.1



供試体 No.2

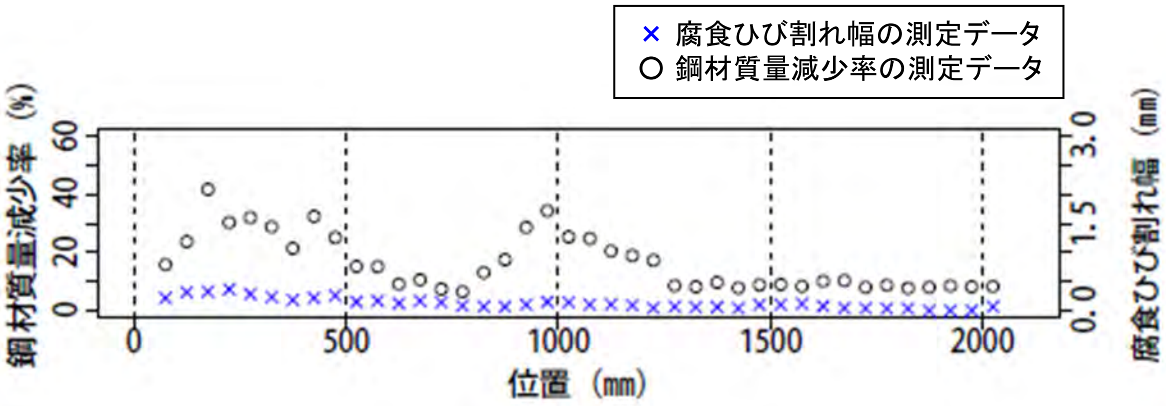


供試体 No.3

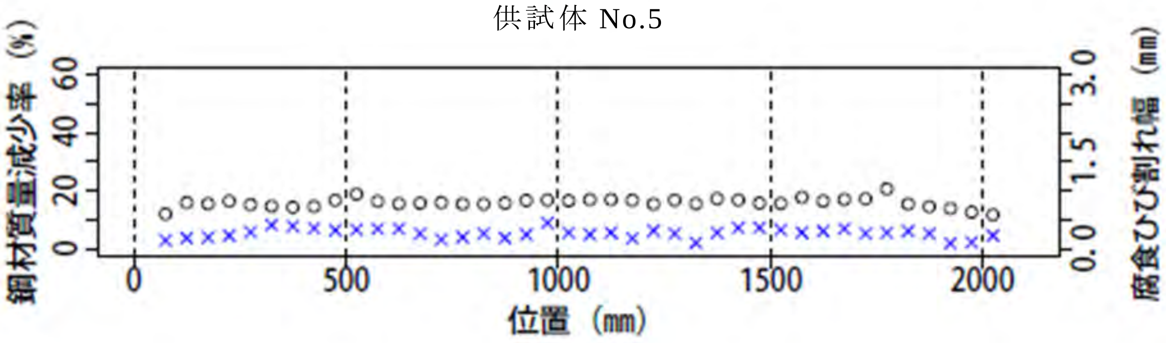


供試体 No.4

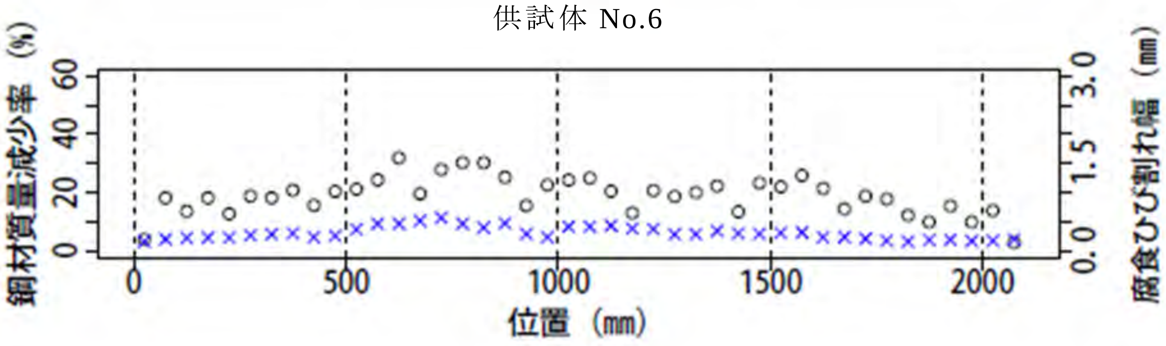
図 4-4(1) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定データ



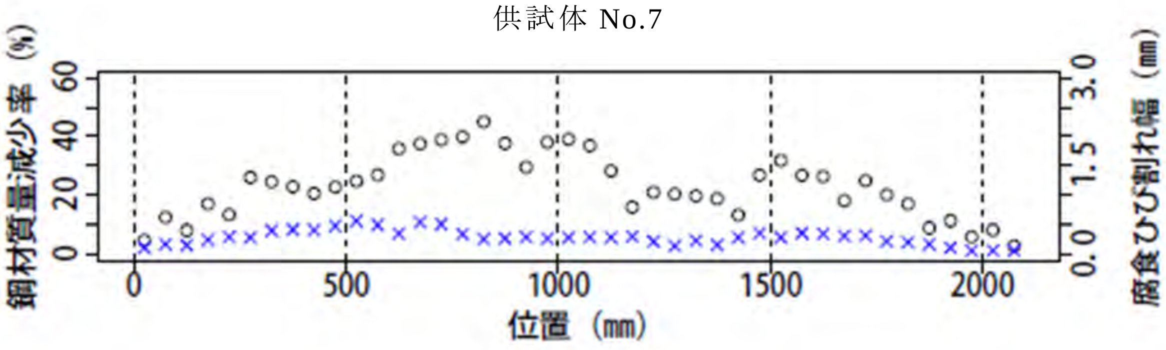
供試体 No.5



供試体 No.6

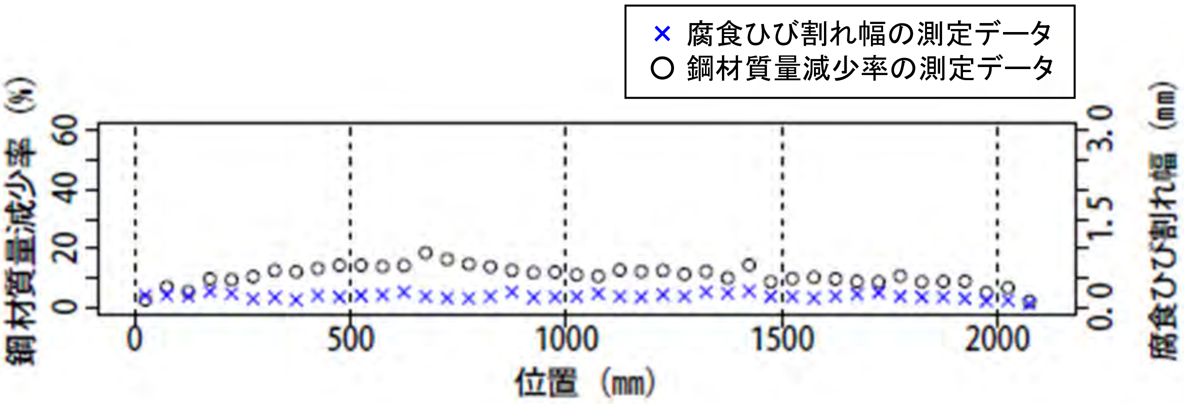


供試体 No.7

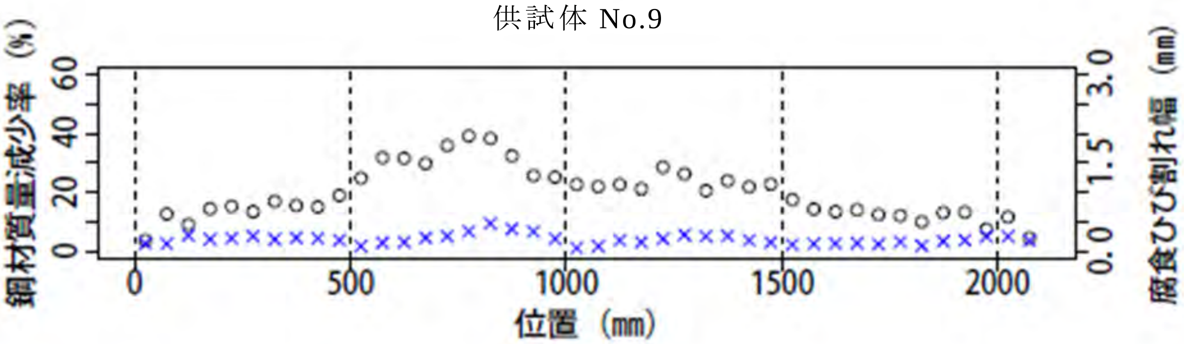


供試体 No.8

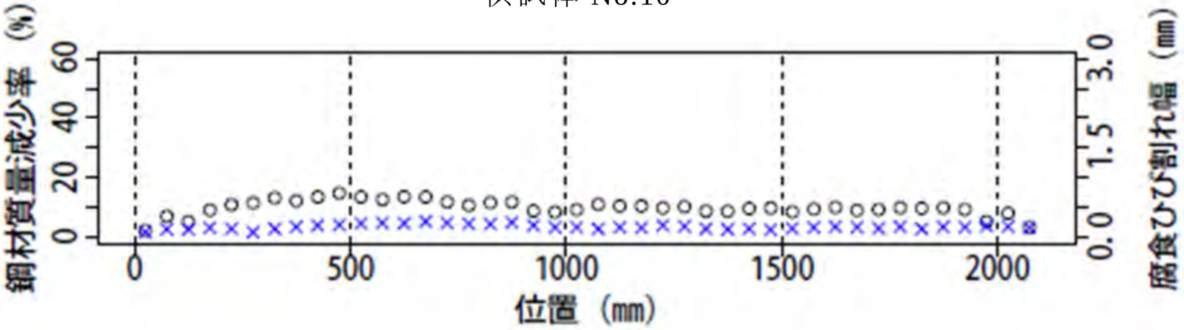
図 4-4(2) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定データ



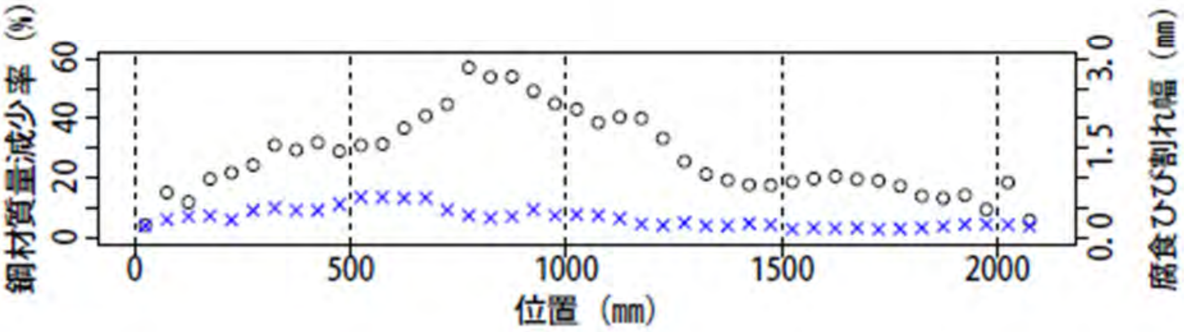
供試体 No.9



供試体 No.10

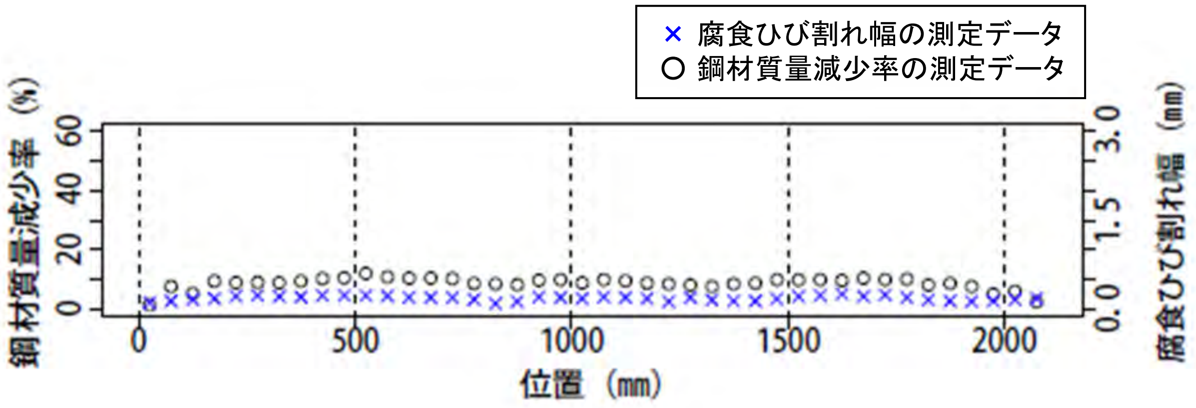


供試体 No.11

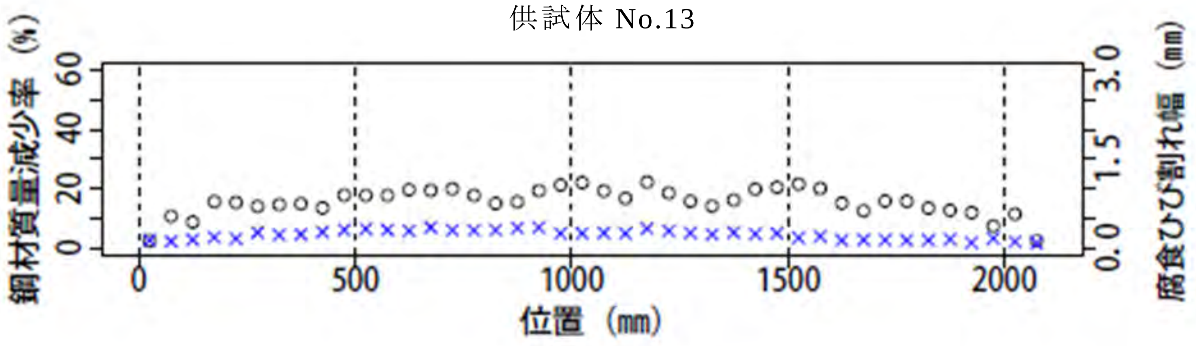


供試体 No.12

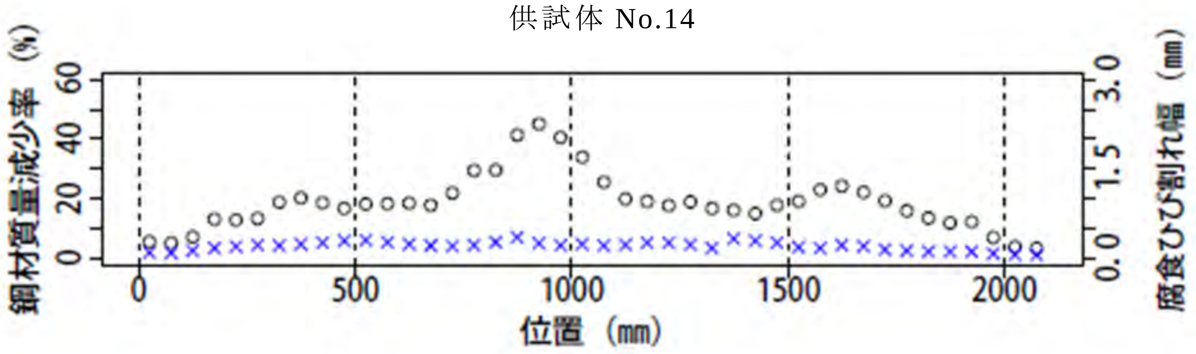
図 4-4(3) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定データ



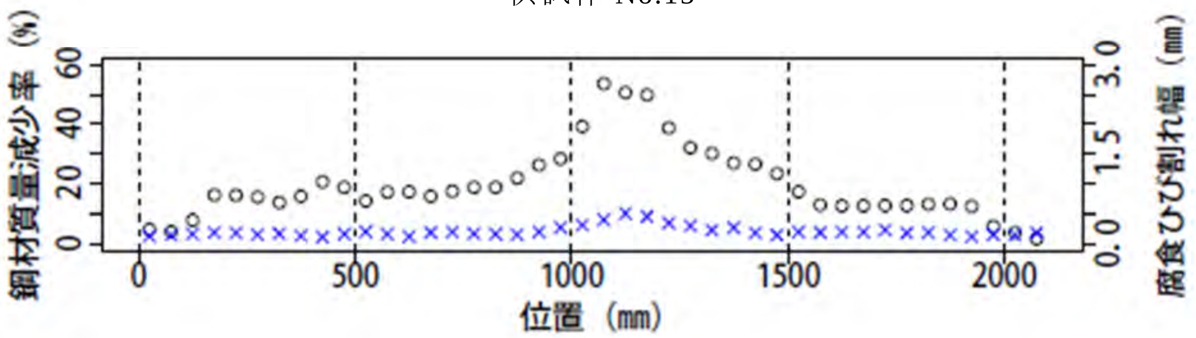
供試体 No.13



供試体 No.14

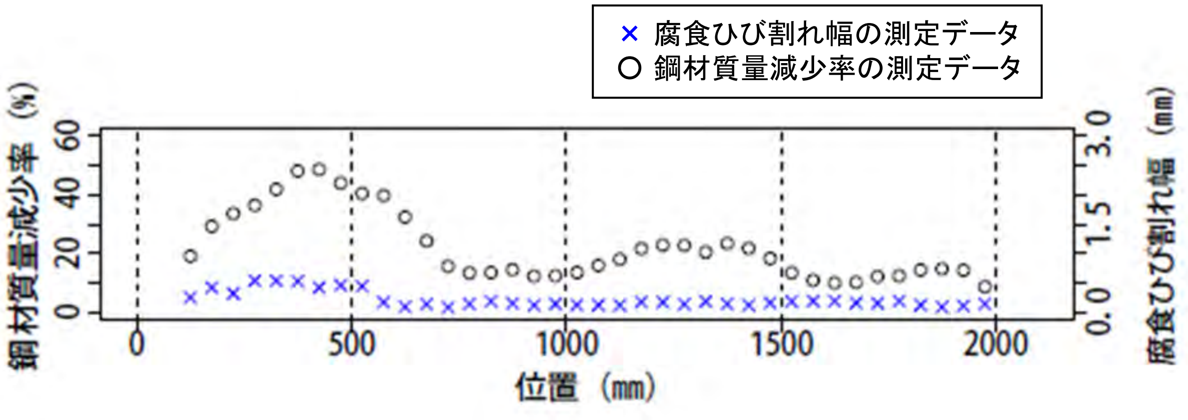


供試体 No.15

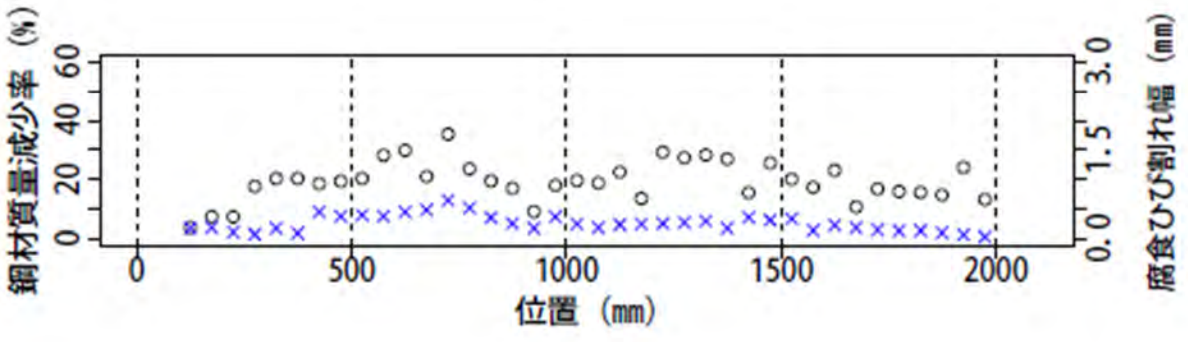


供試体 No.16

図 4-4(4) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定データ



供試体 No.17



供試体 No.18

図 4-4(5) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定データ

4.4 腐食ひび割れ幅に基づく鋼材質量減少率の空間分布推定

4.4.1 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関関係

本検討では 4.3 で述べた供試体の各点についての 3 本の鉄筋による腐食ひび割れ幅および鋼材質量減少率の平均値を対象とし，それぞれの一次元空間分布について検討した．18 供試体の平均腐食ひび割れ幅と平均鋼材質量減少率の関係を図 4-5 に示す．図中の数字は供試体番号，赤丸は各供試体の平均腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率を推定したものである．検討対象とした供試体の鉄筋径およびかぶりはすべて同じであるが，供試体によって圧縮強度が異なり，ひとつの線では表すことが出来ないため供試体ごとに推定値を示した．

図 4-6 に各供試体の散布図，ヒストグラムおよび両者の相関係数を示す．相関係数は，最大で 0.86（供試体 No.16），最小は 0.25（供試体 No.1）であった．相関係数が 0.4 より小さい供試体は，供試体 No.1,6 および 9 である．表 4-3 でこれらの供試体条件を確認すると，目標鋼材質量減少率の小さい供試体，せん断補強筋が全長に渡っていない，あるいはせん断補強筋のない供試体，圧縮強度の小さい供試体の場合に相関が小さくなる傾向が見られる．腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係は，せん断補強筋ありの場合で，鋼材質量減少率がある程度進んだ状態ほど相関係数が大きくなるものと推測される．

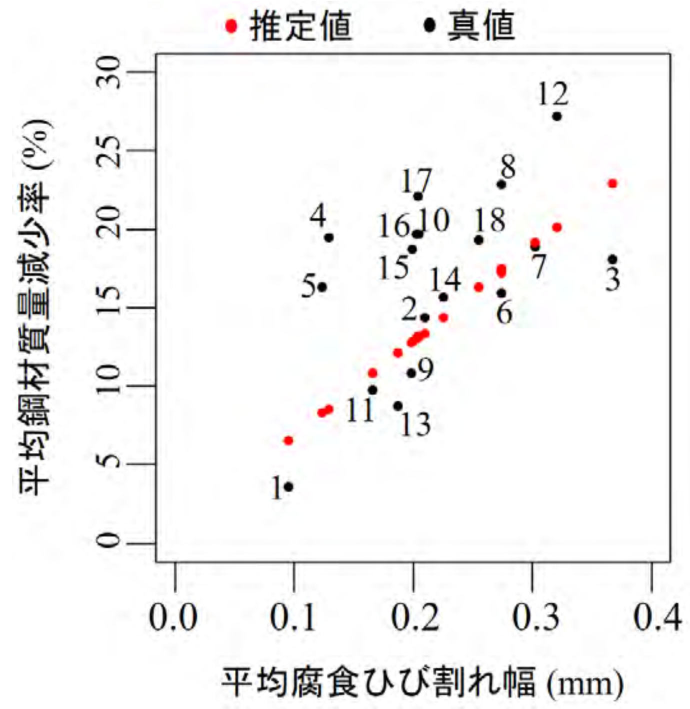
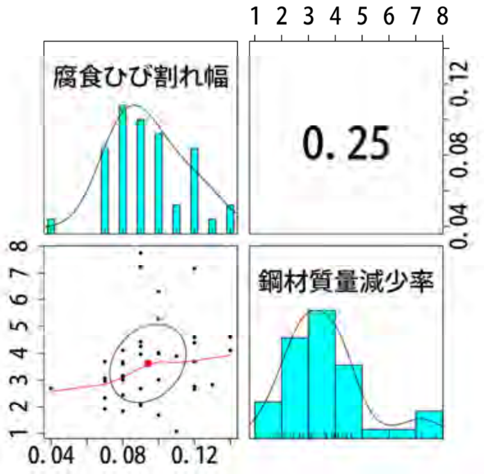
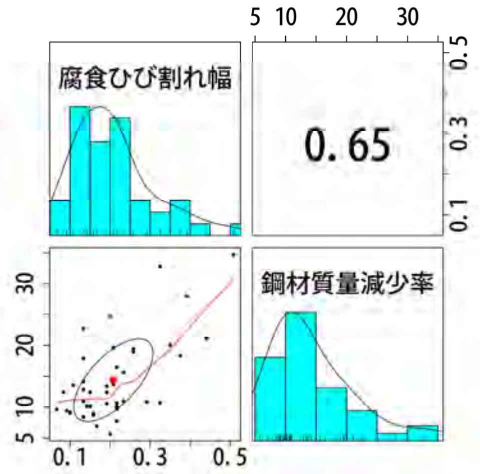


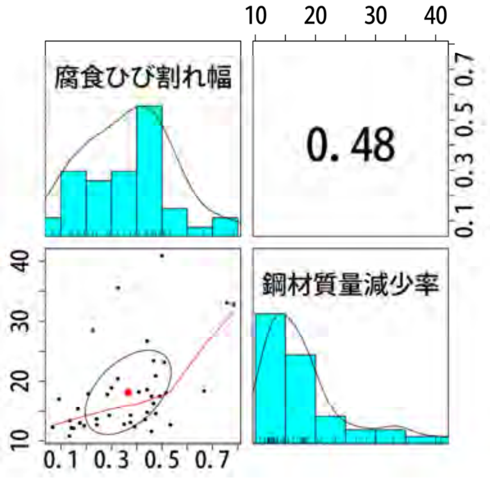
図 4-5 各供試体の平均腐食ひび割れ幅と平均鋼材質量減少率の関係



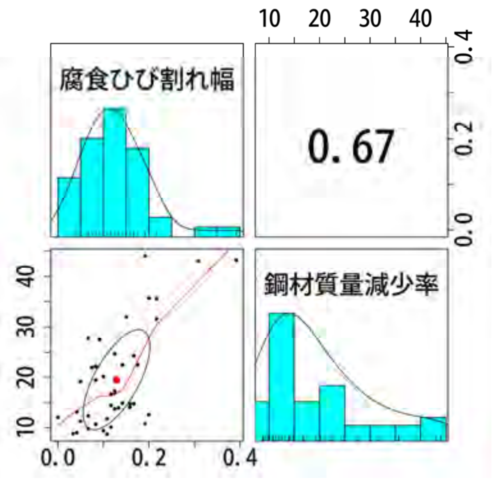
供試体　No.1



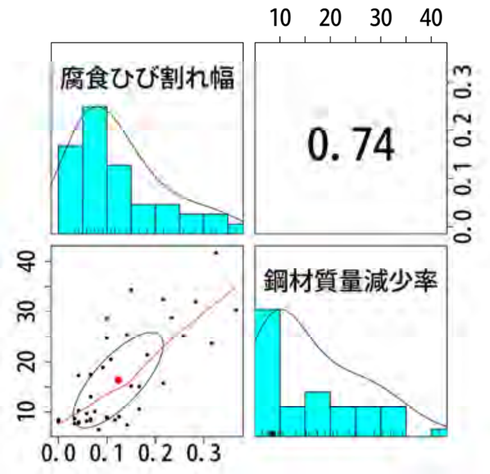
供試体 No.2



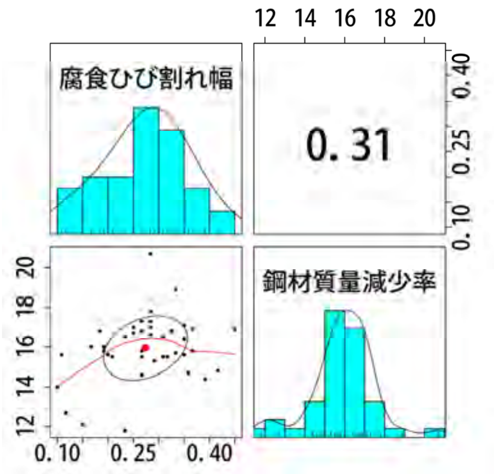
供試体　No.3



供試体 No.4

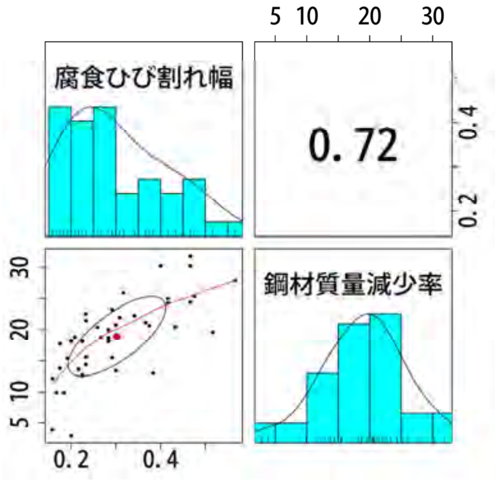


供試体 No.5

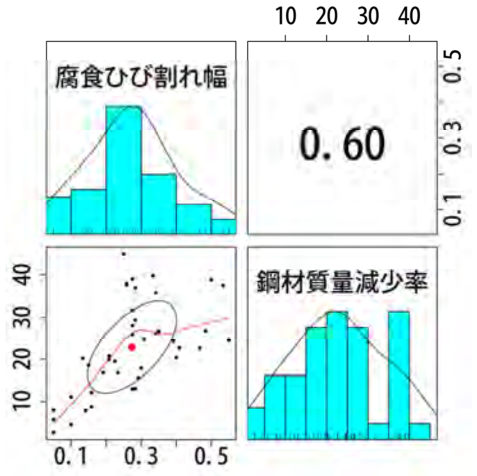


供試体 No.6

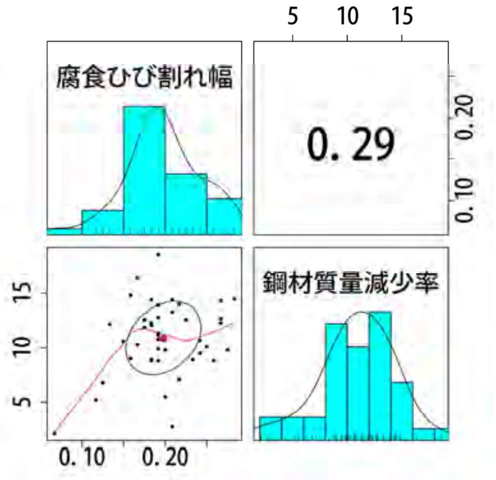
図 4-6(1) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関係数と対散布図



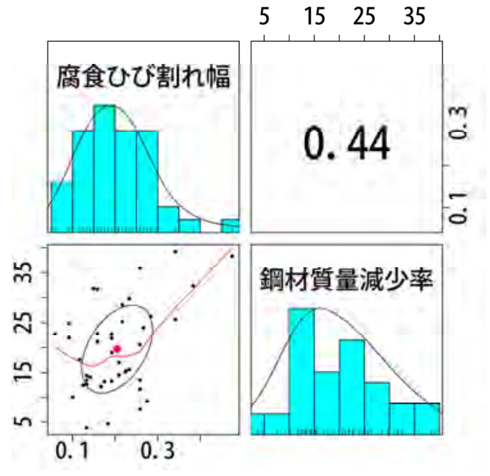
供試体　No.7



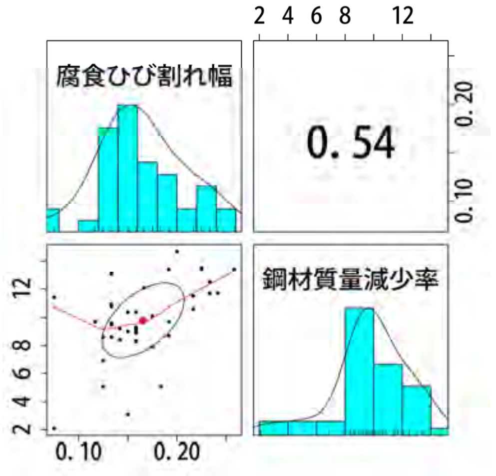
供試体 No.8



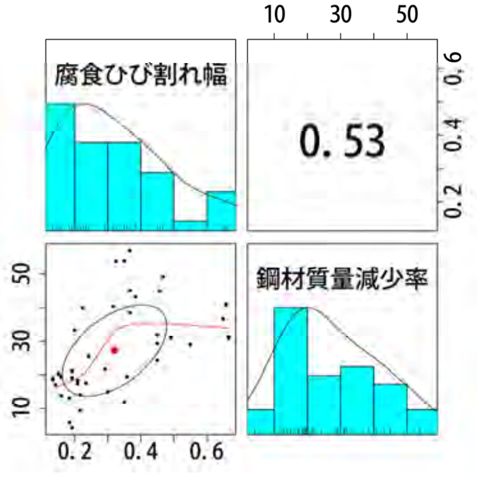
供試体　No.9



供試体 No.10

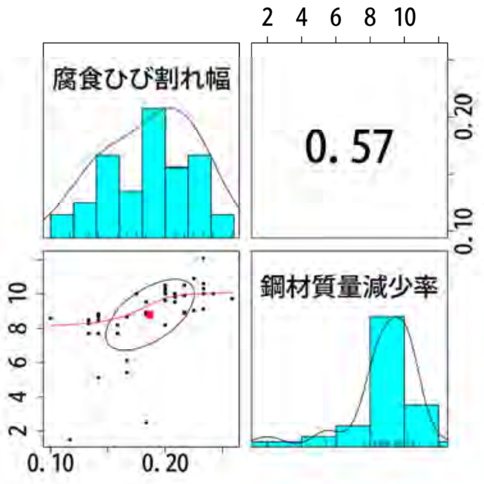


供試体 No.11

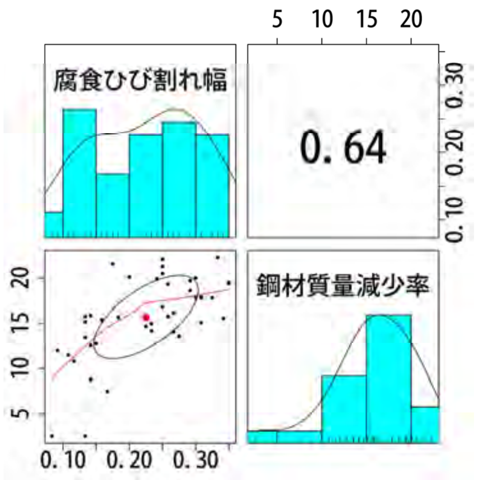


供試体 No.12

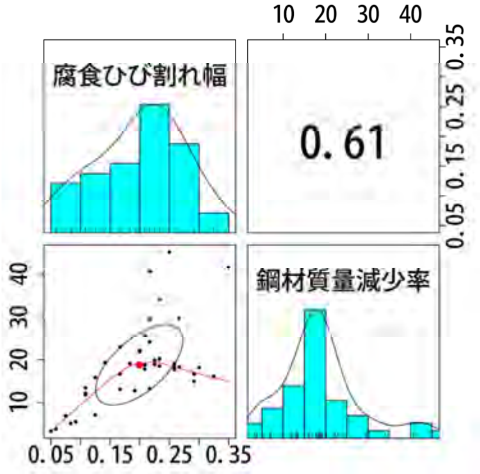
図 4-6(2) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関係数と対散布図



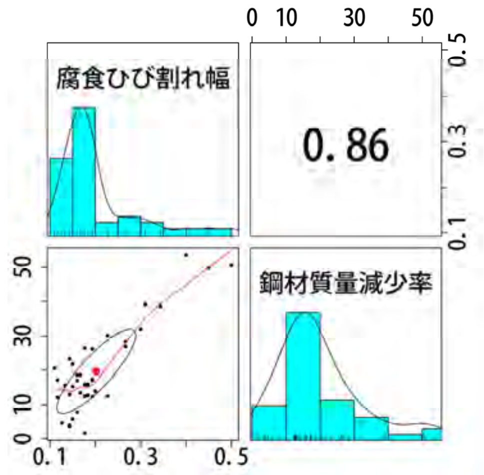
供試体 No.13



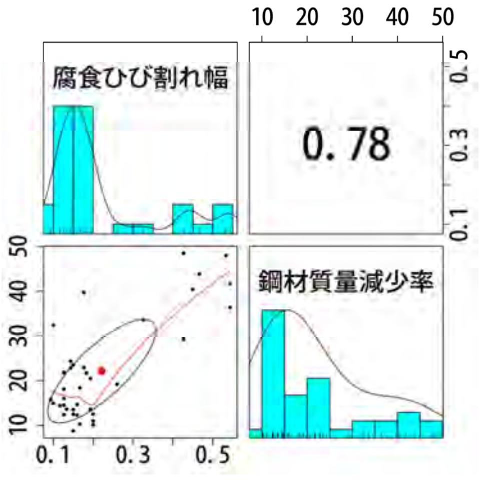
供試体 No.14



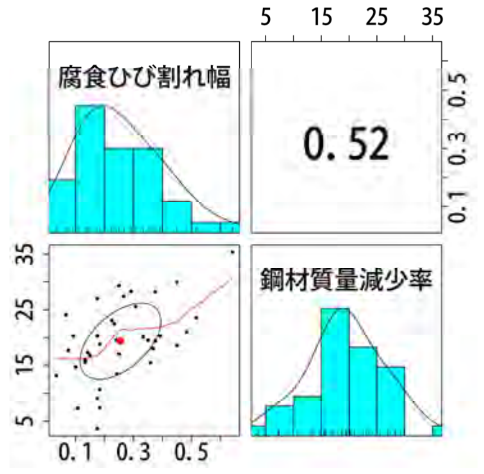
供試体 No.15



供試体 No.16



供試体 No.17



供試体 No.18

図 4-6(3) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関係数と対散布図

4.4.2 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相互相関

(1)　自己相関関数モデルを用いない場合の相互相関

本検討では，まず，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の測定結果と測定位置のみから関数モデルを用いずに相互相関関数のモデル化を試みる．相関係数 ρ は式(4.20)により求めることができる．供試体長手方向の座標値を s とし，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率それぞれの計測箇所の番号を式では i,j(i=1~42，j=1~42)で表している．n は測定地点数(n=42)である．

$$\rho = \frac{1}{n}\frac{\sum_i^n \left(z_{k_1}^{(i)} - \bar{z}_{k_1}\right)\left(z_{k_2}^{(i)} - \bar{z}_{k_2}\right)}{\sigma_{k_1}\sigma_{k_2}} \tag{4.20}$$

ここに，　$\bar{z}$：平均値

σ：標準偏差

添字 $k_{1,}k_2$　：腐食ひび割れ幅および鋼材質量減少率

地点をずらし，地点間の距離に応じた相関係数を求めると相互相関関数になる．全データの関係について，2 点間距離 $s_{k_1}^{(i)} - s_{k_2}^{(j)}$を横軸にとり，式(4.21）から求められる数値を縦軸にして図化した例を図 4-7 に示す．なお，他の供試体に関して図化したものは付録-I を参照されたい．

$$\frac{\left(z_{k_1}^{(i)} - \bar{z}_{k_1}\right)\left(z_{k_2}^{(i)} - \bar{z}_{k_2}\right)}{\sigma_{k_1}\sigma_{k_2}} \tag{4.21}$$

これを移動平均することで相互相関関数を求めることができる．移動平均に用いられる代表的な窓関数としてハニング窓（Hanning Window)，ハミング窓(Hamming Window)等が挙げられるが，本検討では式(4.22)に示すハミング窓を用いて相互相関関数を算定した．

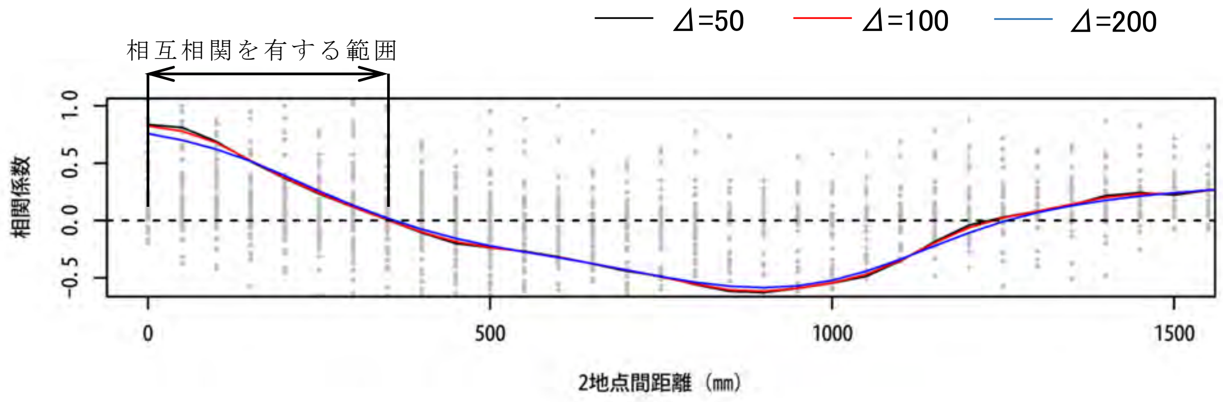
ハミング窓(Hamming Window)

$$w(s) = 0.54 - 0.46cos\left(\frac{2\pi s}{2\Delta}\right) \tag{4.22}$$

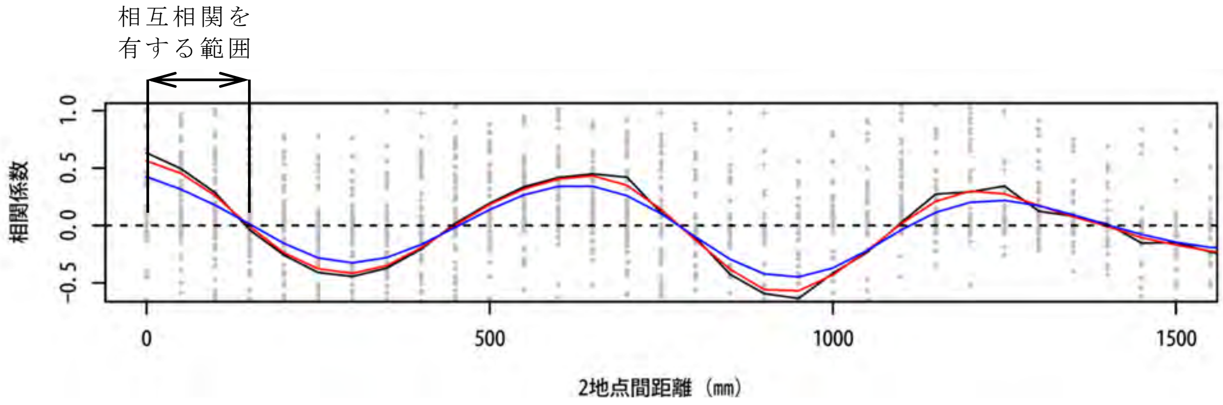
ここで，Δ は移動平均のための重みを考慮する幅であり，本検討では 50，100 及び 200mm の 3 ケースで比較検討した．図 4-7 に算定した相互相関係数を示す．黒線が Δ

=50mm，赤線がΔ=100mm および青線がΔ=200mm の相互相関関数である．2 地点間距離が 1500mm の場合のデータ数は 24 点，2000mm では 4 点と非常にデータ数が少なくなるため，同図では 1500mm までを示した．

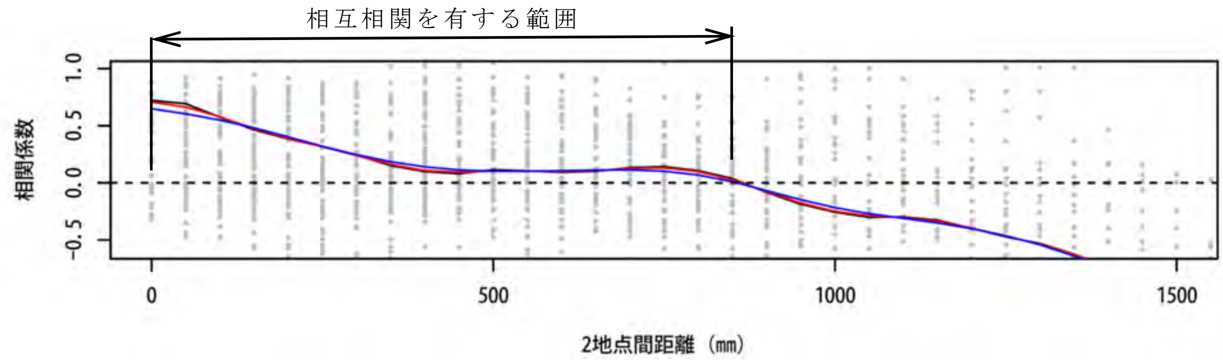
全体的な傾向として，移動平均の重みΔが大きくなると広い範囲で多くのデータから平均が算定されるため多少滑らかになるが，大きな傾向の相違は見られなかった．相互相関を有する範囲を図 4-7 において確認すると，供試体 No.16 ではおよそ 350mm となっている．相互相関を有する範囲は，多くの供試体で 300～600mm の範囲にあった．全供試体中，供試体 No.2 は相互相関を有する範囲の最も狭いケースで，その範囲はおよそ 150mm であった．一方，供試体 No.5 は最も範囲が広くおよそ 850mm であった．供試体 No.2 では相関係数が変動し，供試体 No.16 では距離の遠い所で相関係数が大きくなっている．このような傾向が見られるのは，データが少ないことによるばらつきの影響と考えられる．本検討で使用したデータ数程度では，ノンパラメタリックに相互相関関数を決めるのは困難であった．なお，他の供試体の算定結果は添付資料-Iを参照されたい．



相互相関を有する範囲の標準ケース：供試体 No.16



相互相関を有する範囲の狭いケース：供試体 No.2



相互相関を有する範囲の広いケース：供試体 No.5

図 4-7 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の距離との相互相関関係
自己相関関数モデルを用いない場合

(2) 自己相関関数を用いた場合の相互相関

4.2 において示した Markovian（single exponential）モデルと Gaussian（squared exponential）モデルの 2 つの自己相関関数モデルを用いた検討を行った．検討を行うに当たり，それぞれのモデルにおいて，腐食ひび割れ幅を対象として観測量誤差を考慮しない場合と考慮する場合のモデルの適合性について AIC を用いて評価した．自己相関関数モデルに用いる腐食ひび割れ幅の標準偏差，SOF および観測量誤差の確率場のパラメータは最尤法を用いて算定した．算定結果を表 4-4 および表 4-5 に示す．また各供試体に対する AIC を図 4-8 および図 4-9 に示す．

表 4-4 表 4-4 によれば，自己相関関数モデルとして Markovian を用いた場合，観測量誤差（ホワイトノイズ）を考慮した場合に求められた観測量誤差の標準偏差はほとんどの供試体で 1.0×10^{-4} 以下となり，観測量誤差の考慮の有無による相違はほとんど生じなかった．そのため，図 4-8 に示すように AIC による適合性は，多くの供試体でパラメータ数が多い観測量誤差を考慮した場合の方が少し悪くなった．一方，自己相関関数モデルとして Gaussian を用いた場合，供試体 No.6 の観測量誤差の標準偏差は 1.0×10^{-4} 以下であるものの，それ以外の供試体では 1.0×10^{-2} 以上の観測量誤差の標準偏差が求められ，両者の AIC の値にも相違が生じた．図 4-9 に示すように，供試体 No.6 を除いても No.8 および 9 のように AIC の適合性が観測量誤差を考慮しない場合の方が良い場合があるものの，多くの供試体で観測量誤差を考慮した場合の方が良好な結果となった．以上の結果に基づき以降の検討では，Markovian では観測量誤差を考慮しない場合を，Gaussian では観測量誤差を考慮した場合を用いて，Markovian モデルと Gaussian モデルを比較しながら検討を実施することにした．なお，Markovian（観測量誤差なし）と Gaussian（観測量誤差あり）の AIC を比較すると，Markovian（観測量誤差なし）の方が，若干，値が小さく，良好な適合性を示していた．

図 4-10 および図 4-11 に GPR による腐食ひび割れ幅の推定結果の例を示す．図 4-10 は自己相関関数として Markovian（観測量誤差なし）を用いた場合を，図 4-11 には自己相関関数として Gaussian（観測量誤差あり）を用いた場合である．これらの図では，腐食ひび割れ幅の測定結果を×で，太線が推定された腐食ひび割れ幅の空間分布，点線がその 95%信頼性区間である．図 4-10 の上段に示した供試体 No.1 の Markovian（観測量誤差なし）の推定結果と図 4-11 の上段の Gaussian（観測量誤差あり）の推定結果を比較すると，両者にはあまり相違が見られない．しかし，両図の中段に示した供試体 No.5 を比較すると，Markovian（観測量誤差なし）では測定結果と推定値がすべて一致しているのに対して，Gaussian（観測量誤差あり）では推定値が測定結果と一致せず，空間分布曲線は全体の傾向を滑らかな曲線で示している．Markovian（観測量誤差なし）に関して 95%信頼性区間を見ると，測定点ではばらつきがないものの，測定点を離れると Gaussian（観測量誤差あり）と同様にばらつきが生じている．両図の下段

に示した供試体 No.17 は，供試体 No.5 の傾向がさらに顕著な例である．両者を比較すると，左端の位置では明らかな形状の相違が見られる．なお，他の供試体の算定結果は添付資料-IIを参照されたい．

鋼材質量減少率についても，Markovian および Gaussian に対して，最尤法を用いて標準偏差および SOF の確率場のパラメータを算定した．その結果を表 4-6 に示す．図 4-12 に，2 点間距離 $s_{k_1}^{(i)} - s_{k_2}^{(j)}$ を横軸に，相関係数を縦軸にとり，設定した確率場のパラメータを用いて算定した相互相関関数の例を示す．例では，自己相関関数モデルを用いない場合と同じ供試体 No.16, 2 および 5 を上から順番に示した. 青線が Markovian（観測量誤差なし）で赤線が Gaussian（観測量誤差あり）である．いずれも関数形が固定されているため安定した形となっている．相互相関を有する範囲を確認すると，Markovian（観測量誤差なし）に比べて Gaussian（観測量誤差あり）の方が相互相関を有する範囲が狭い傾向が見られる．ただし，Gaussian（観測量誤差あり）は 2 点間距離が 0 近傍では相関係数は大きくなっていた．なお，他の供試体の算定結果は添付資料−Iを参照されたい．

表 4-4 腐食ひび割れ幅の最尤推定値および AIC, Markovian

供試体 No	平均 (mm)	観測量誤差なし			観測量誤差あり			
		標準偏差	SOF	AIC	標準偏差	SOF	観測量誤差の標準偏差	AIC
1	0.09	0.02	173.7	-201.1	0.01	170.0	0.018	-200.2
2	0.21	0.10	148.9	-85.2	0.10	148.9	$<1.0\times10^{-4}$	-83.2
3	0.37	0.17	269.8	-53.6	0.16	269.8	0.020	-51.6
4	0.13	0.07	259.2	-122.2	0.07	259.2	0.014	-120.3
5	0.12	0.08	749.5	-137.4	0.08	749.5	$<1.0\times10^{-4}$	-135.4
6	0.27	0.08	130.6	-92.4	0.08	130.6	$<1.0\times10^{-4}$	-90.4
7	0.30	0.10	527.7	-113.2	0.11	527.7	$<1.0\times10^{-4}$	-111.2
8	0.27	0.13	563.8	-98.0	0.13	563.8	$<1.0\times10^{-4}$	-96.0
9	0.20	0.04	100.1	-146.3	0.04	118.7	$<1.0\times10^{-4}$	-144.2
10	0.20	0.08	242.1	-112.6	0.08	244.2	$<1.0\times10^{-4}$	-110.6
11	0.17	0.04	348.3	-182.2	0.04	356.3	$<1.0\times10^{-4}$	-180.3
12	0.32	0.14	843.1	-106.4	0.14	843.1	$<1.0\times10^{-4}$	-104.4
13	0.19	0.04	225.9	-175.7	0.04	233.6	$<1.0\times10^{-4}$	-173.7
14	0.23	0.08	661.8	-142.8	0.07	1020.1	0.021	-143.9
15	0.20	0.08	612.6	-140.4	0.08	612.6	$<1.0\times10^{-4}$	-138.4
16	0.20	0.08	530.4	-137.7	0.08	530.5	$<1.0\times10^{-4}$	-135.7
17	0.20	0.12	473.7	-86.8	0.12	473.7	0.010	-84.8
18	0.25	0.14	287.6	-64.3	0.13	287.6	0.033	-62.6

表 4-5 腐食ひび割れ幅の最尤推定値および AIC, Gaussian

供試体 No	平均 (mm)	観測量誤差なし			観測量誤差あり			
		標準偏差	SOF	AIC	標準偏差	SOF	観測量誤差の標準偏差	AIC
1	0.09	0.02	65.0	-202.0	0.02	65.1	0.007	-200.1
2	0.21	0.09	91.6	-83.0	0.08	208.7	0.056	-84.8
3	0.37	0.16	105.7	-46.8	0.15	259.3	0.080	-51.7
4	0.13	0.07	97.8	-113.7	0.06	301.3	0.039	-121.0
5	0.12	0.08	127.2	-114.5	0.08	267.5	0.021	-134.3
6	0.27	0.09	110.8	-96.7	0.09	110.8	$<1.0\times10^{-4}$	-94.7
7	0.30	0.10	131.5	-105.1	0.10	159.6	0.022	-105.0
8	0.27	0.12	131.0	-88.9	0.12	131.0	0.007	-86.9
9	0.20	0.04	82.1	-143.9	0.04	82.2	0.007	-141.9
10	0.20	0.08	111.4	-110.3	0.08	250.6	0.035	-114.8
11	0.17	0.04	113.5	-170.0	0.04	259.7	0.016	-179.4
12	0.32	0.13	139.6	-86.5	0.14	228.3	0.029	-97.9
13	0.19	0.04	111.0	-173.8	0.04	167.3	0.014	-175.7
14	0.23	0.07	111.3	-119.0	0.06	271.1	0.027	-136.5
15	0.20	0.07	121.5	-129.9	0.07	208.5	0.022	-136.1
16	0.20	0.08	135.5	-130.4	0.08	241.7	0.022	-137.0
17	0.20	0.12	122.5	-72.6	0.12	204.2	0.044	-79.7
18	0.25	0.13	97.0	-53.7	0.12	258.6	0.065	-62.8

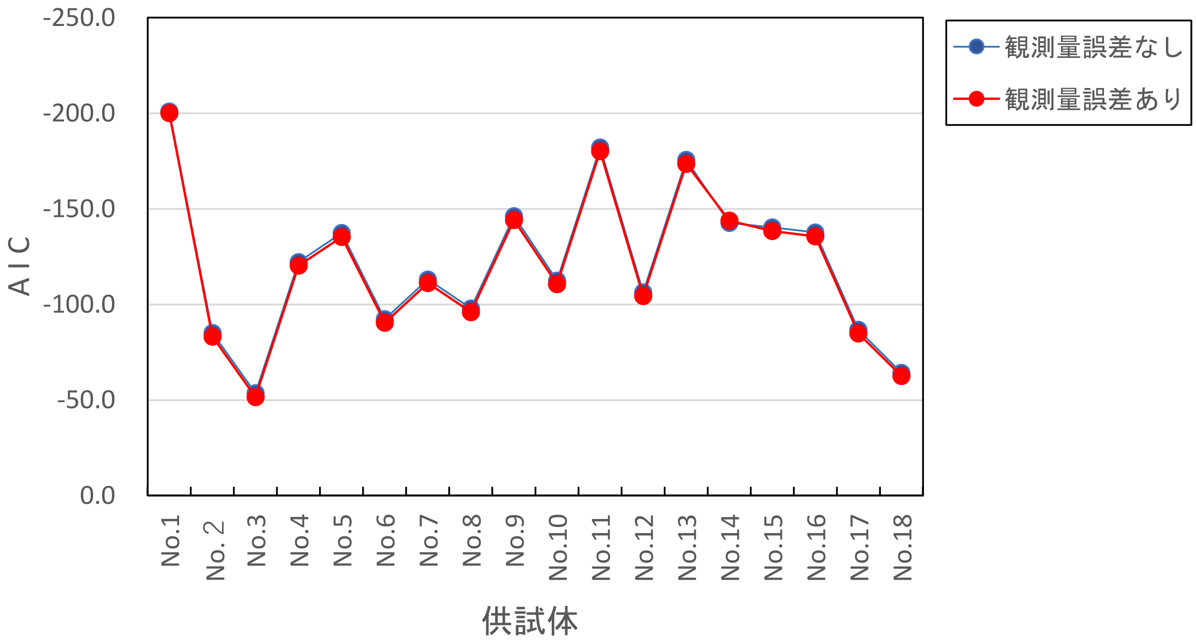


図 4-8 AIC による適合度比較，Markovian

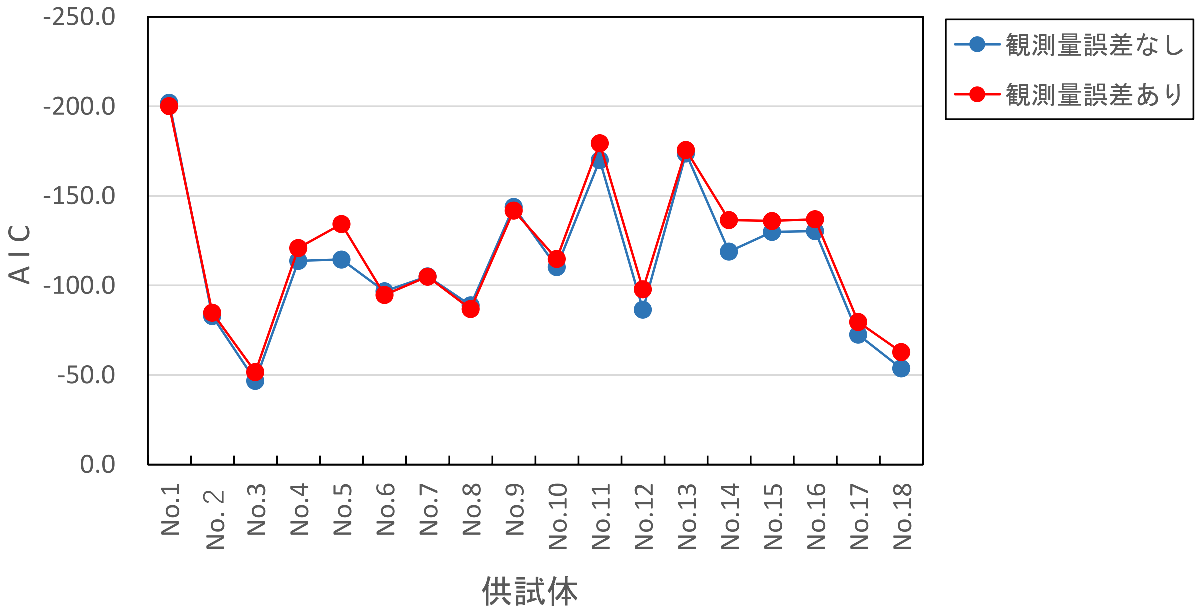
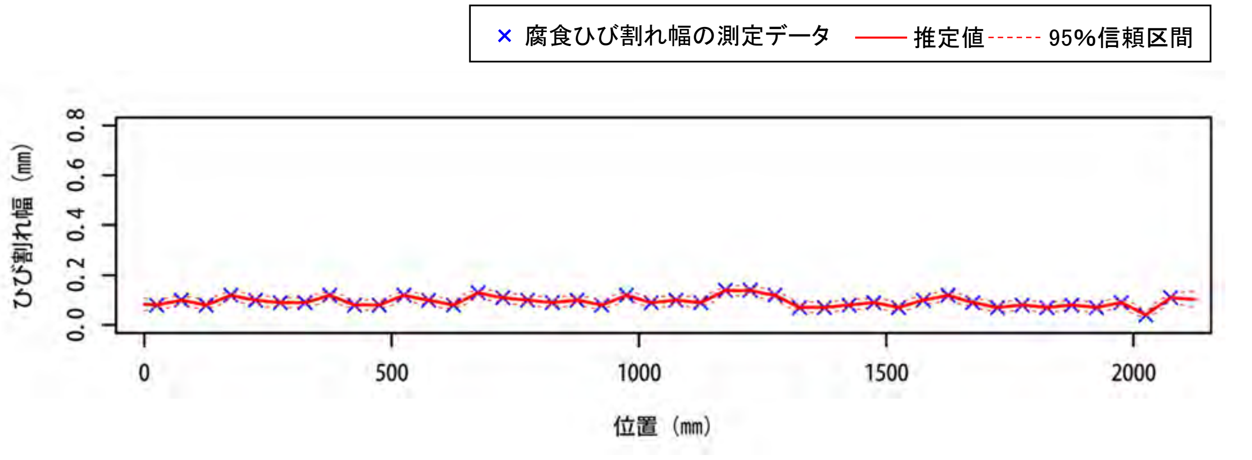
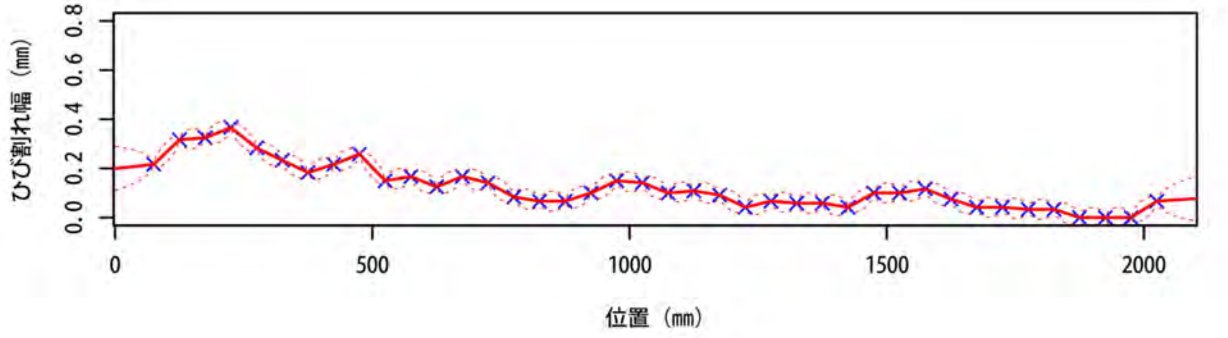


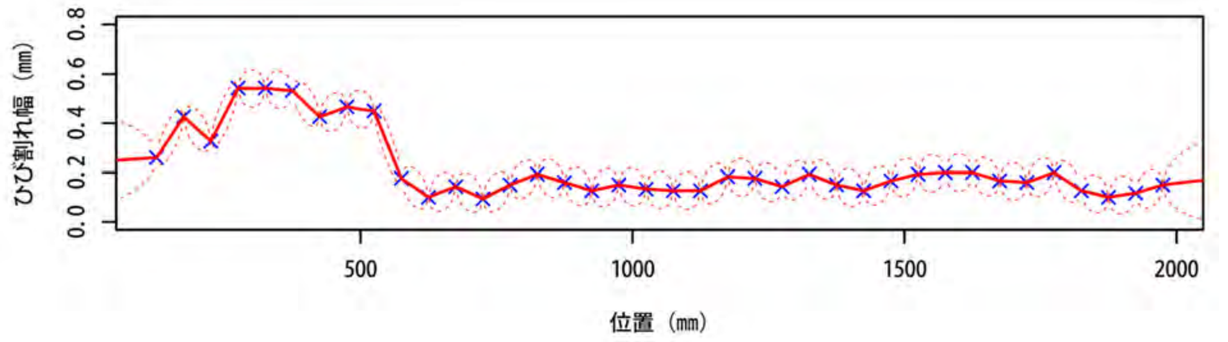
図 4-9 AIC による適合度比較，Gaussian



供試体 No.1

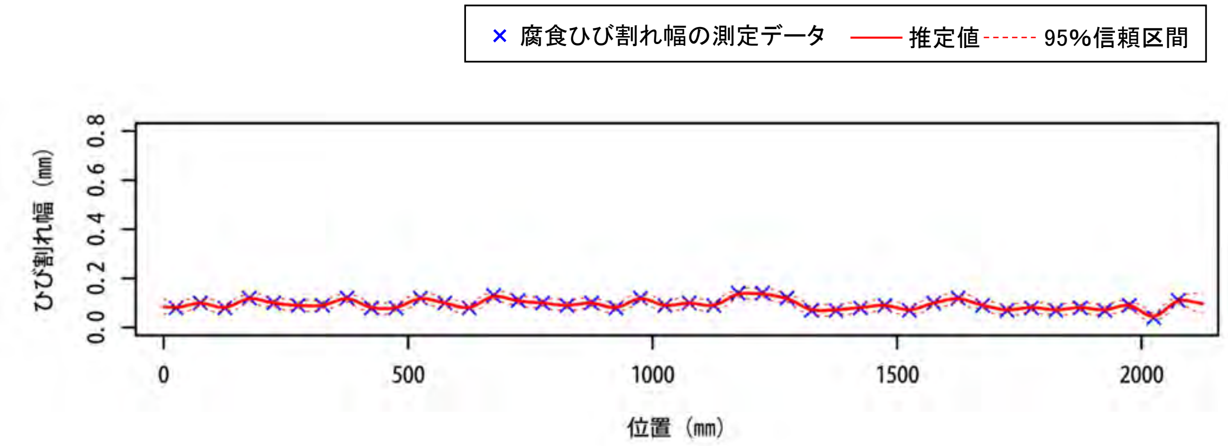


供試体 No.5

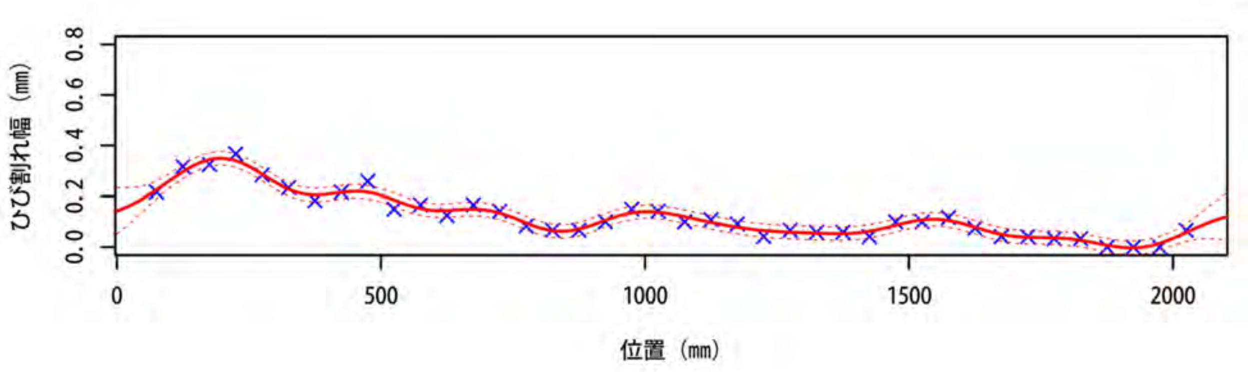


供試体 No.17

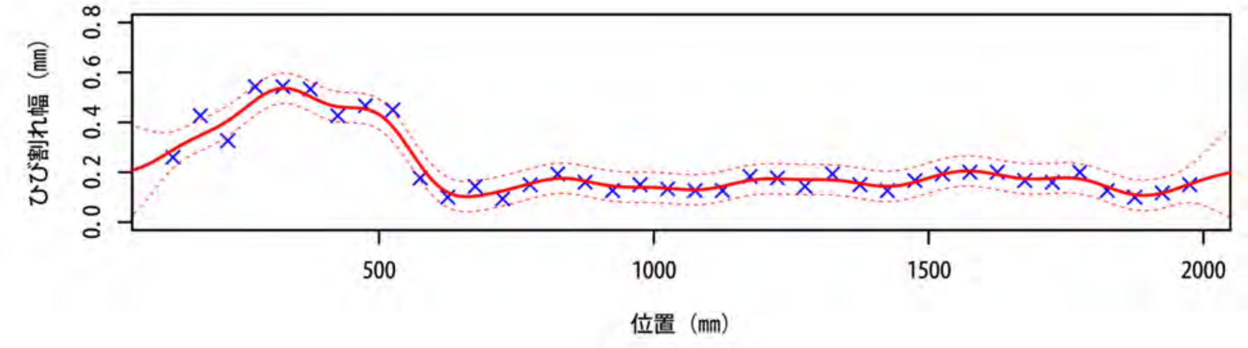
図 4-10 腐食ひび割れ幅の推定結果，Markovian（観測量誤差なし）



供試体 No.1



供試体 No.5

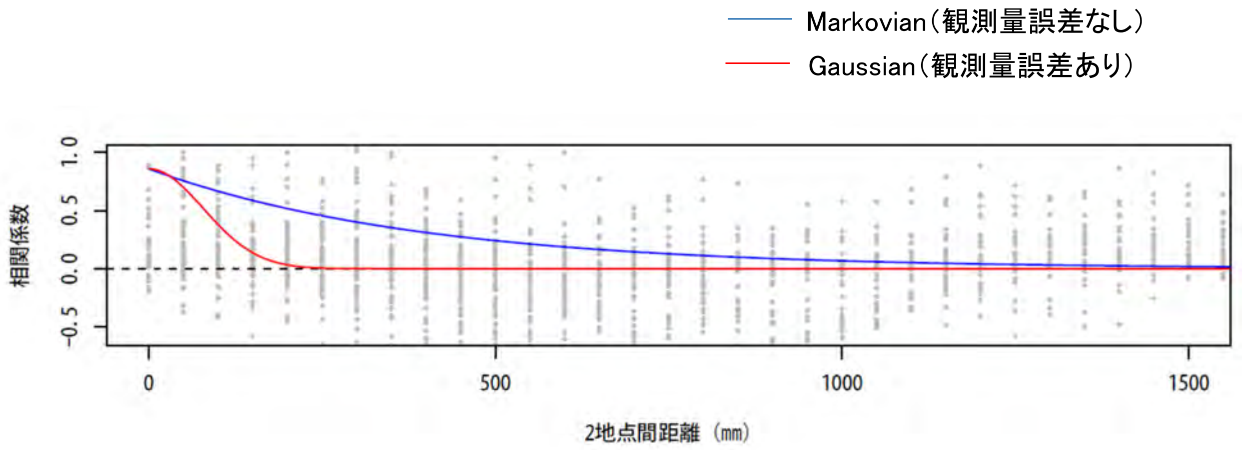


供試体 No.17

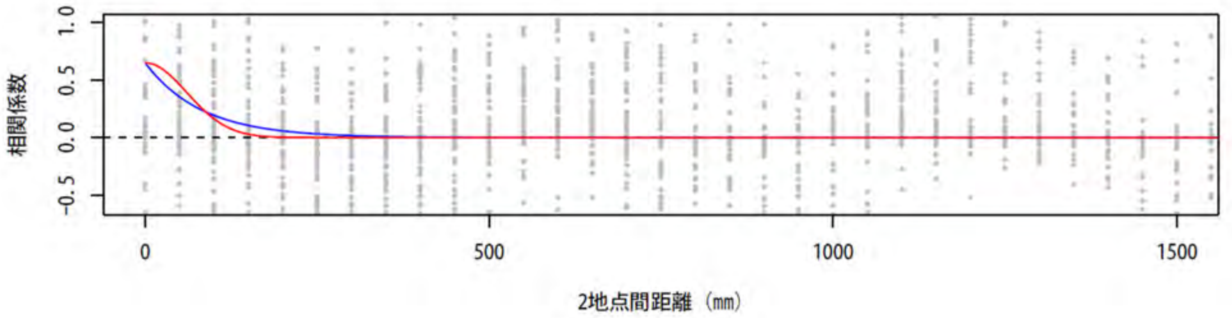
図 4-11 腐食ひび割れ幅の推定結果，Gaussian（観測量誤差あり）

表 4-6 鋼材質量減少率の最尤推定値

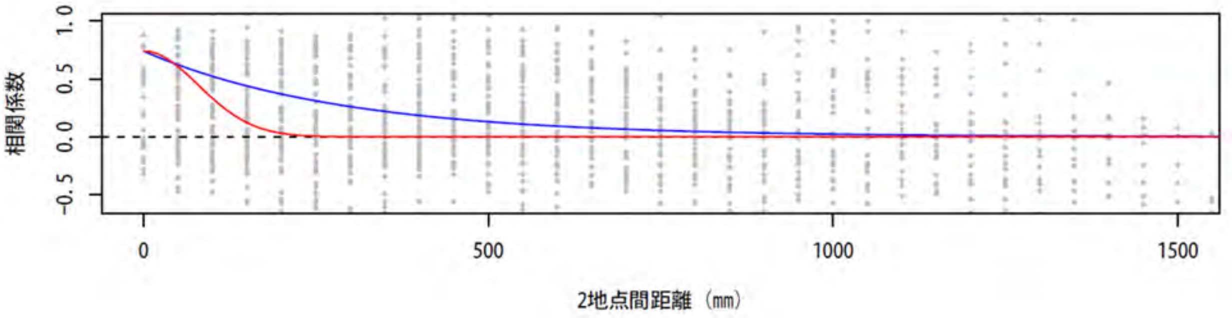
供試体No	平均(%)	Markovian		Gaussian	
		標準偏差	SOF	標準偏差	SOF
1	11.03	1.48	200.0	1.41	88.0
2	17.98	6.63	181.3	6.43	93.3
3	27.51	6.44	389.3	6.41	119.6
4	13.15	10.17	369.3	9.41	129.2
5	12.77	8.79	400.3	8.78	129.1
6	21.86	1.68	160.0	1.59	89.2
7	23.66	6.57	161.6	6.23	82.2
8	21.97	11.02	587.3	9.79	113.8
9	17.31	3.88	551.8	3.19	101.7
10	17.73	8.66	856.3	8.33	139.6
11	15.35	2.88	419.9	2.62	109.2
12	24.70	12.22	1126.0	12.38	141.2
13	16.65	2.60	433.2	2.04	92.0
14	18.96	5.45	465.3	4.58	108.6
15	17.40	8.68	953.2	7.68	145.2
16	17.59	10.77	1046.0	9.94	151.3
17	17.70	9.13	1016.4	8.83	153.6
18	20.81	6.80	119.8	6.65	79.1



供試体 No.16



供試体 No.2



供試体 No.5

図 4-12 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の距離との相互相関関係
自己相関関数モデルを用いた場合

4.4.3 鋼材質量減少率の空間分布推定結果

4.4.2 の検討結果を踏まえて，Markovian（観測量誤差なし）および Gaussian（観測量誤差あり）を用いて最尤法から求めた 2 種類の相互相関関数で，腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率の空間分布を推定した．表 4-7 および表 4-8 は，平均腐食ひび割れ幅に基づく平均鋼材質量減少率の推定式(3.9)に用いた RC 供試体の設計変数およびカテゴリーデータの回帰係数である．

Markovian（観測量誤差なし）に基づく相互相関関数を用いた推定結果を図 4-13 に，Gaussian（観測量誤差あり）に基づく相互相関関数を用いた推定結果を図 4-14 に示す．いずれの図においても，図中の太線が推定された鋼材質量減少率の空間分布，点線がその 95％信頼性区間，×印が腐食ひび割れ幅，○印が実験で得られた鋼材質量減少率（真値）の空間分布である．

Markovian（観測量誤差なし）に基づく相互相関関数を用いた場合と Gaussian（観測量誤差あり）に基づく相互相関関数を用いた場合に推定結果の曲線の滑らかさには相違があるものの，全体的な推定傾向は全供試体で一致している．この滑らかさの相違は，Gaussian は 2 点間距離が 0 近傍で相関が大きいのに対して，Markovian は 2 点間距離が 0 から少し離れるだけで相関が急激に低下するためである．

推定結果は，①全体的に良好に空間分布が再現されているケース，②平均にずれがあるが空間分布の特徴が良好に再現できているケース，③空間分布の特徴が部分的に再現されていて平均は良好に推定できているケース，④平均にずれはあるが空間分布の特徴が部分的に再現されているケース⑤平均は良好に推定できているが空間分布の特徴は捉えられていないケースおよび⑥平均，空間分布の特徴ともにあまり捉えられていないケースの 6 つのケースに分類できる．以下に分類結果を示す．

① のケース：供試体 No.2, No.6, No.7, No.11, No.14, No.16
② のケース：供試体 No.1, No.13
③ のケース：供試体 No.8, No.18
④ のケース：供試体 No.4, No.5, No.10, No.17
⑤ のケース：供試体 No.9, No.15
⑥ のケース：供試体 No.3, No.12

鋼材質量減少率の空間分布は腐食ひび割れ幅の空間分布に依存して決まるため，⑥のケースのように腐食ひび割れ幅に鋼材質量減少率の空間分布の特徴が表れていない場合には推定が困難である．すべてが①のケースのように良好に鋼材質量減少率の空間分布を推定出来ないまでも，②から④のケースに分類された供試体はある程度の推

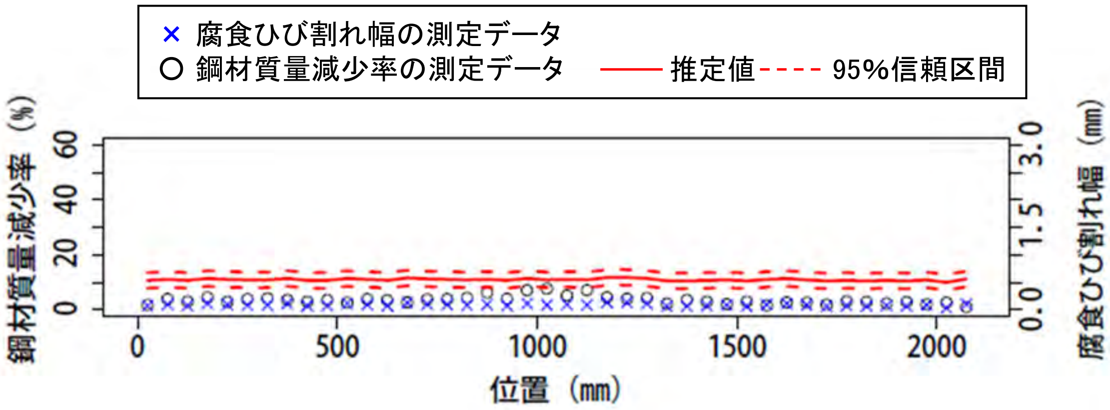
定はできており，全供試体の 8 割を占める．GPR を用いて腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率を推定する手法は，鋼材質量減少率を推定する有効な手段であると考える．

表 4-7 RC 供試体の設計変数

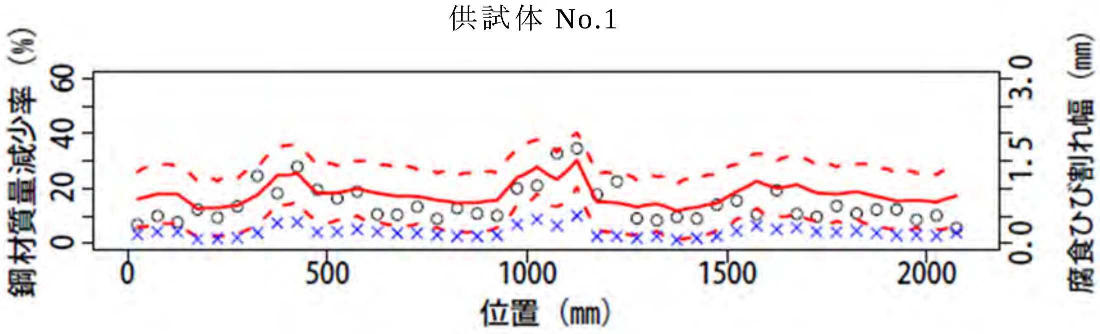
コンクリート強度	f'c (N/mm^2)	各供試体の一軸圧縮試験結果表4-3参照
かぶり（純かぶり）	c (mm)	32
鉄筋径	ϕ (mm)	16

表 4-8 カテゴリーデータの回帰係数

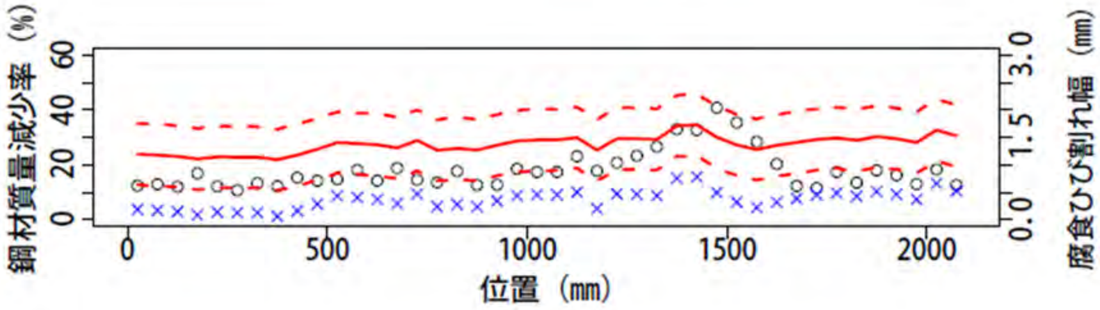
腐食方法の係数 β_1	電食（高電流）	2.5
鉄筋種類の係数 β_2	異形鉄筋	1.0
せん断補強筋の有無の係数 β_3	なし (供試体No. 6)	1.0
	あり (供試体No. 1～5, 7, 8, 18)	2.4
	あり（一部） (供試体No. 9～17)	2.4
鉄筋配置の係数 β_4	タイプC	1.1



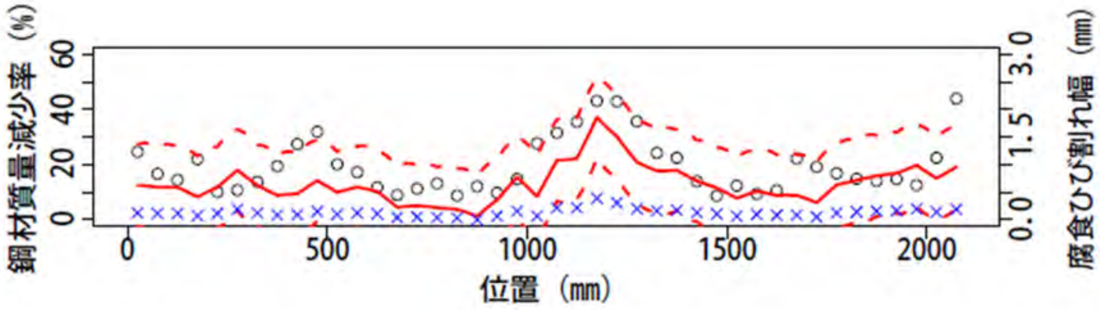
供試体 No.1



供試体 No.2

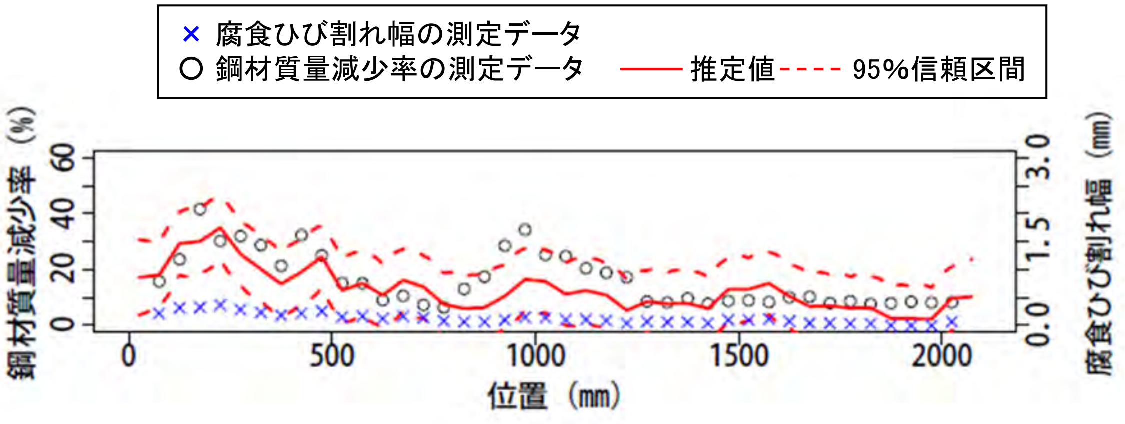


供試体 No.3

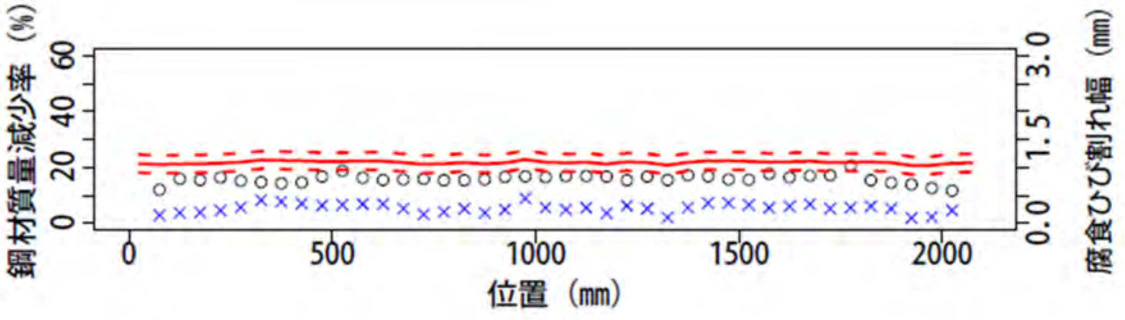


供試体 No.4

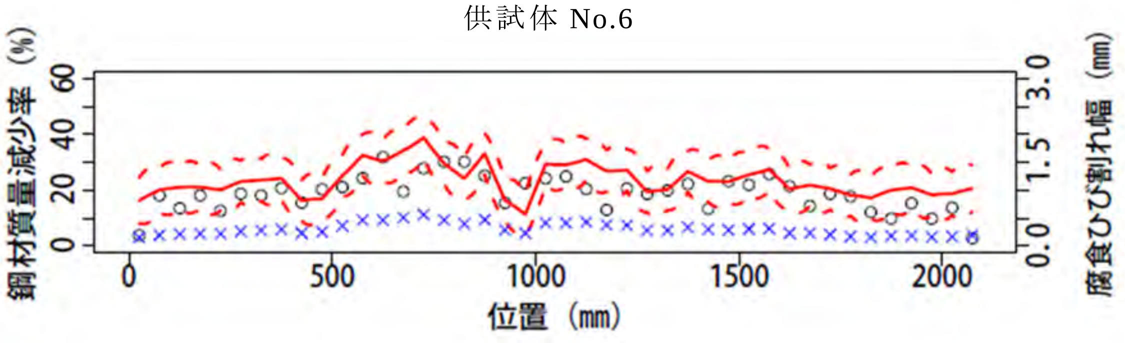
図 4-13(1) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Markovian（観測量誤差なし）



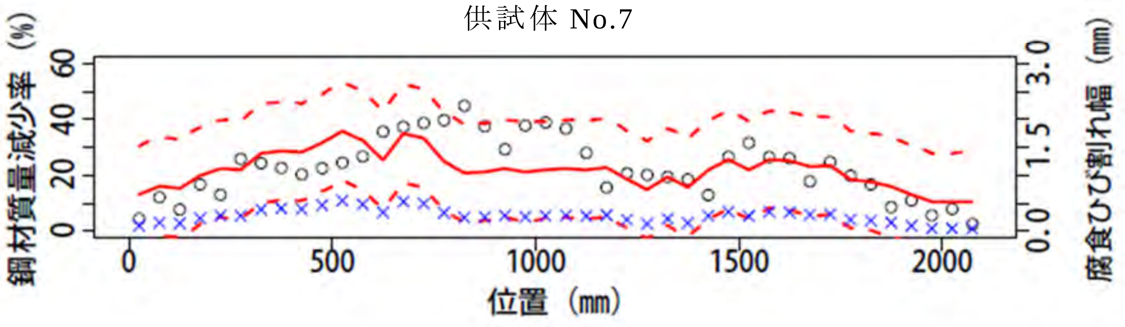
供試体 No.5



供試体 No.6

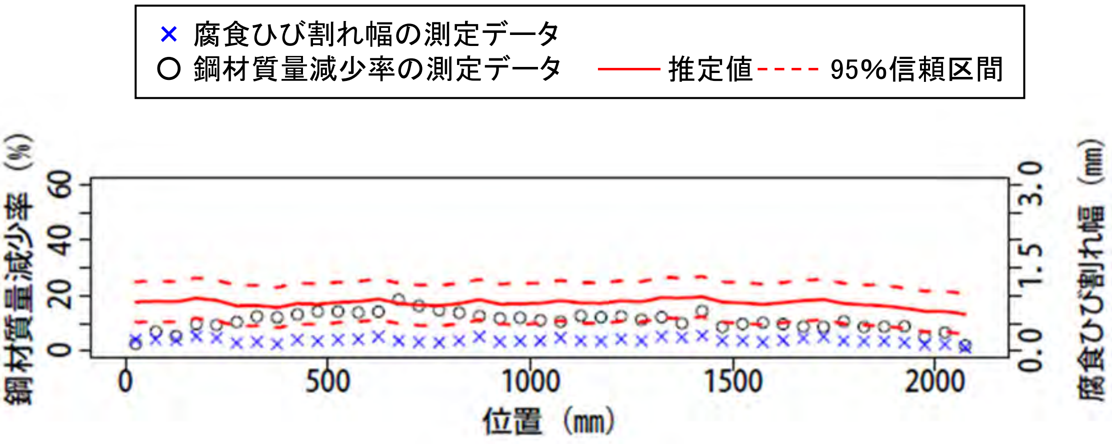


供試体 No.7

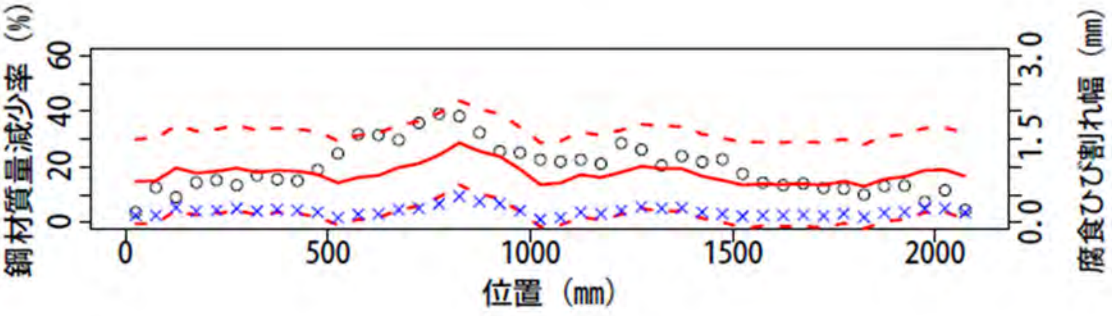


供試体 No.8

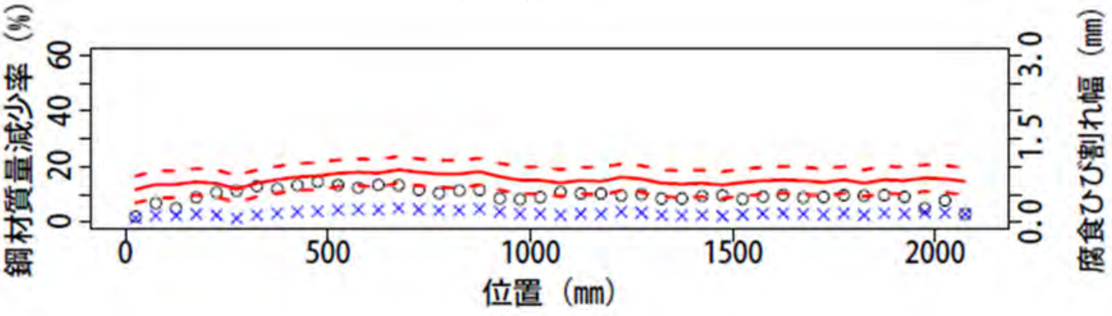
図 4-13(2) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Markovian（観測量誤差なし）



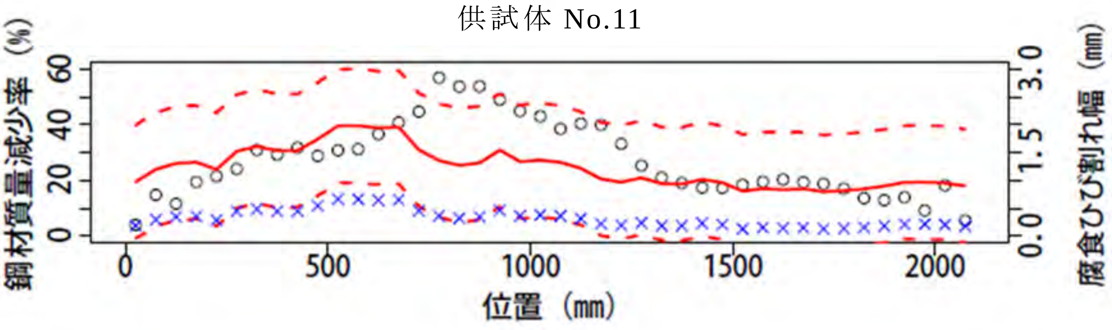
供試体 No.9



供試体 No.10



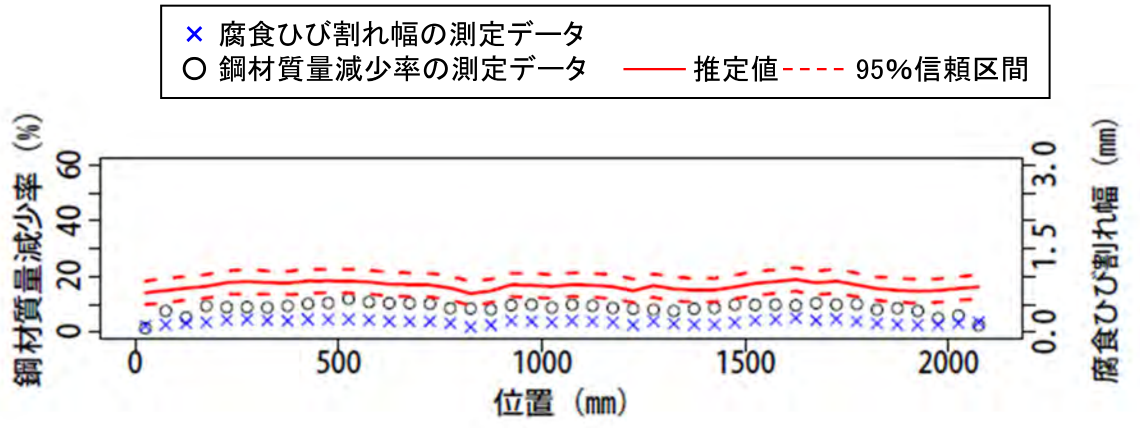
供試体 No.11



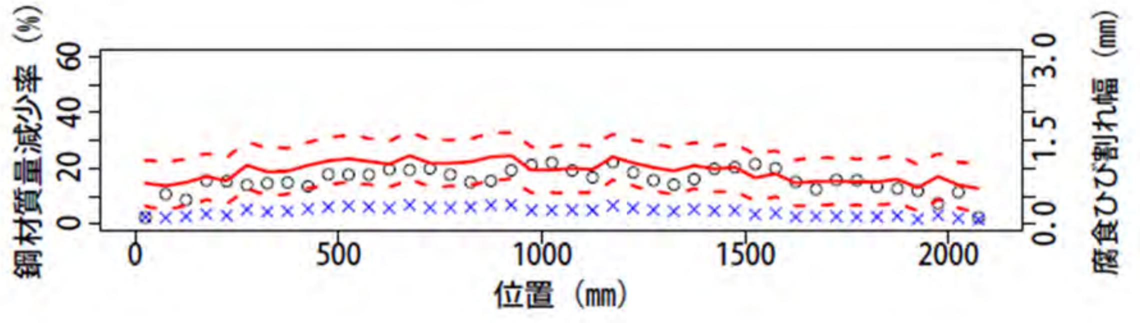
供試体 No.12

図 4-13(3) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率

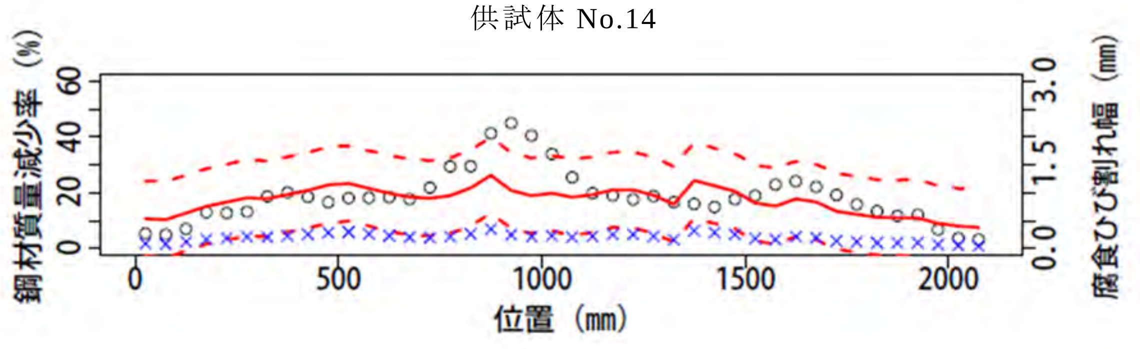
Markovian（観測量誤差なし）



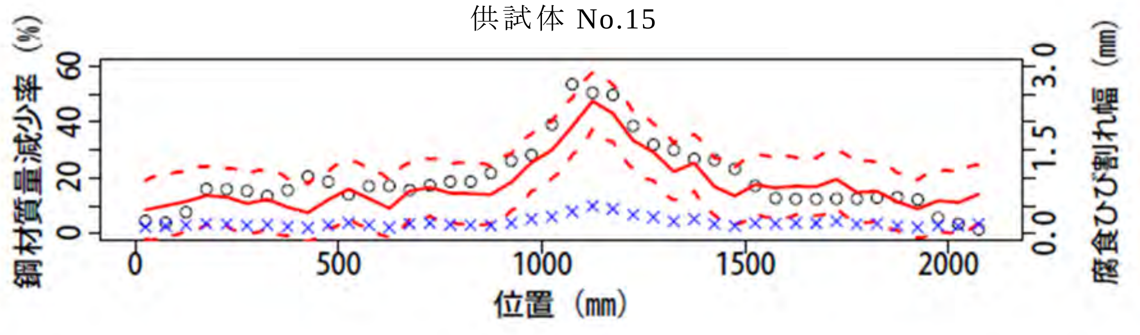
供試体 No.13



供試体 No.14



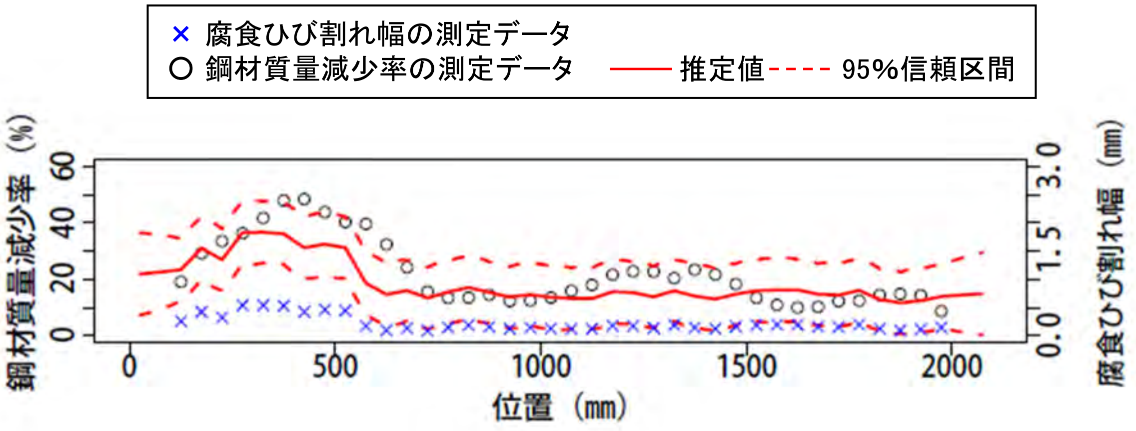
供試体 No.15



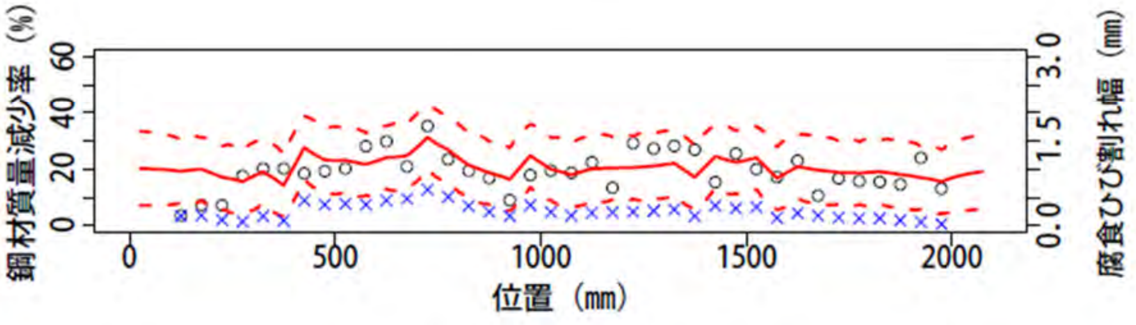
供試体 No.16

図 4-13(4) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率

Markovian（観測量誤差なし）

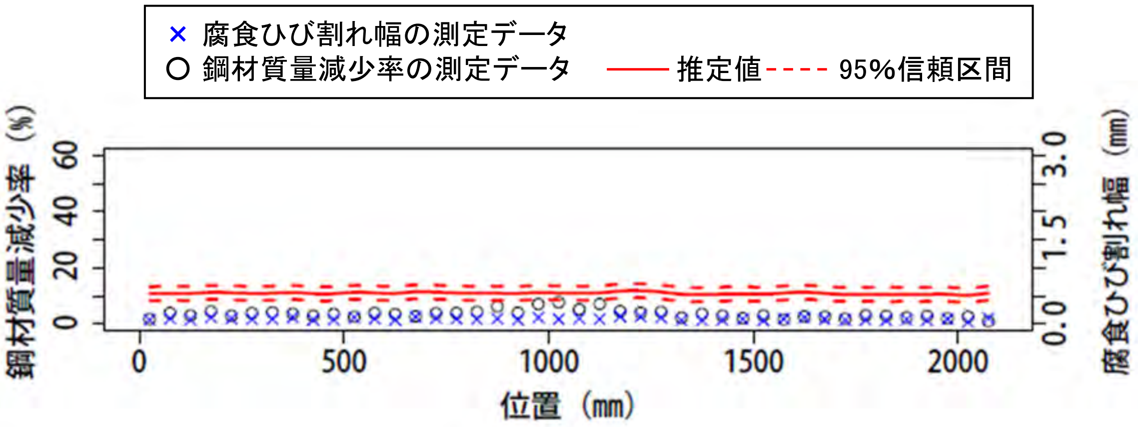


供試体 No.17

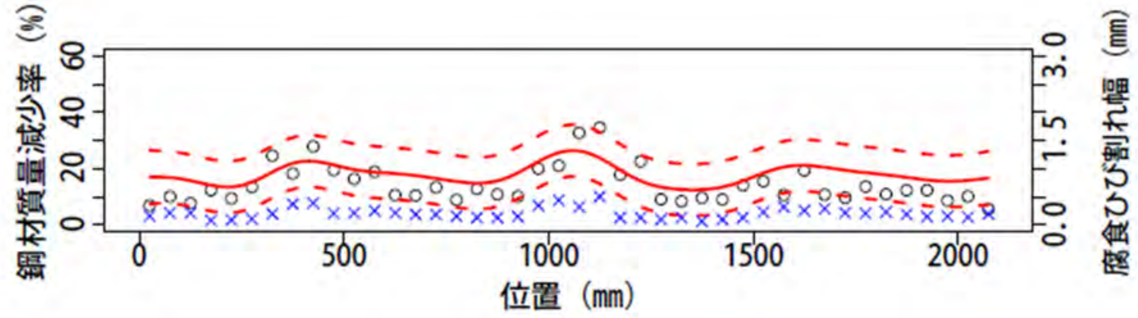


供試体 No.18

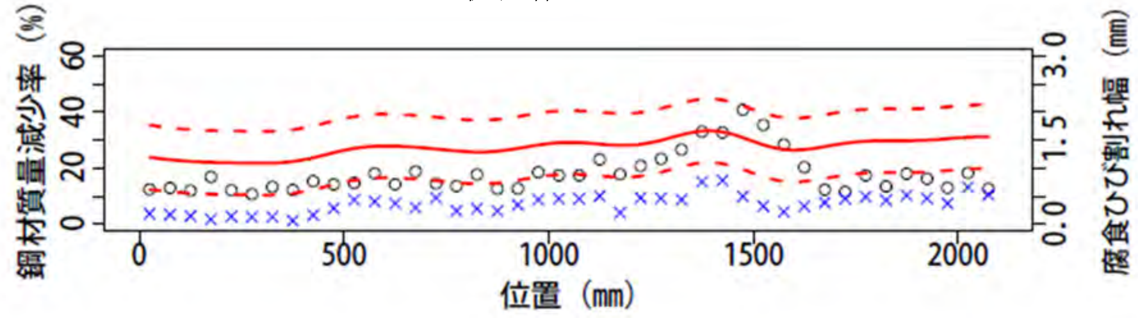
図 4-13(5) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Markovian（観測量誤差なし）



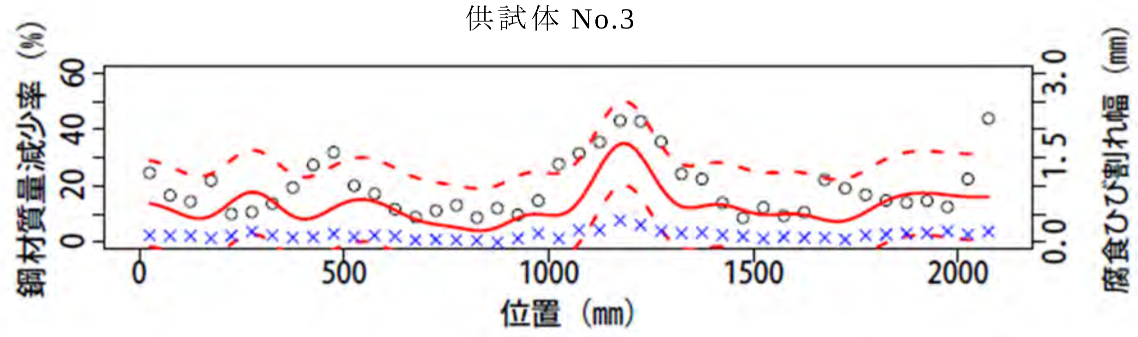
供試体 No.1



供試体 No.2



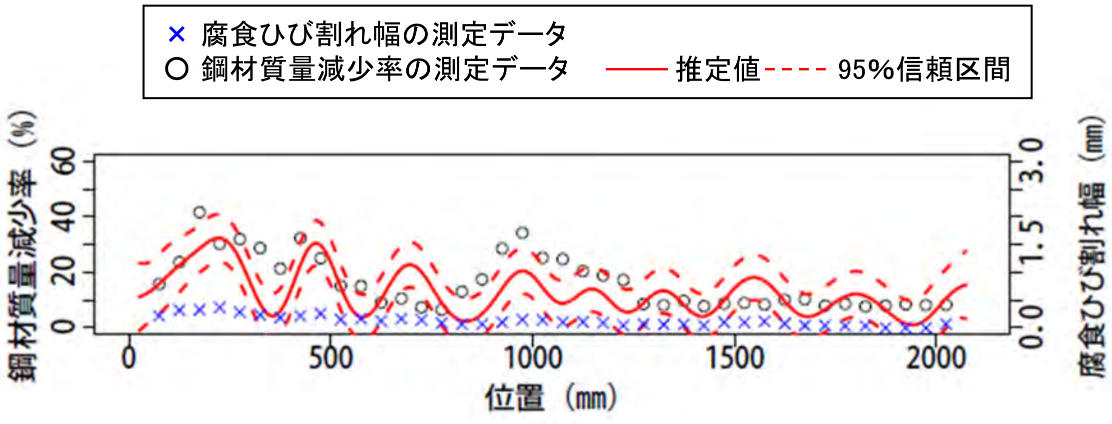
供試体 No.3



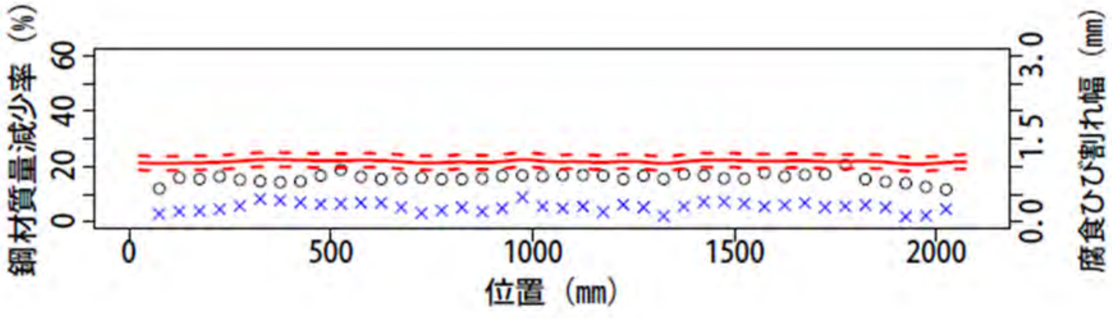
供試体 No.4

図 4-14(1) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率

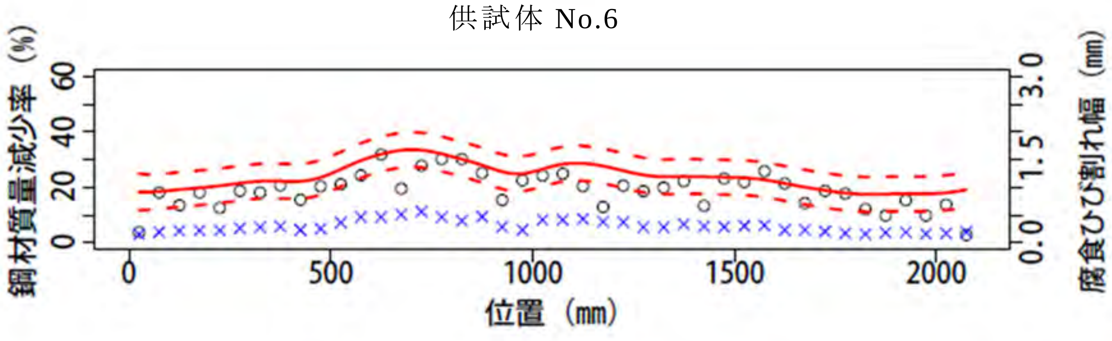
Gaussian（観測量誤差あり）



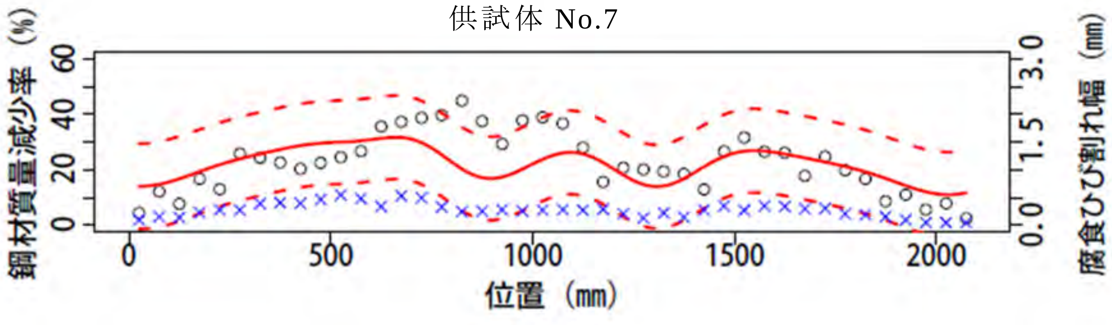
供試体 No.5



供試体 No.6

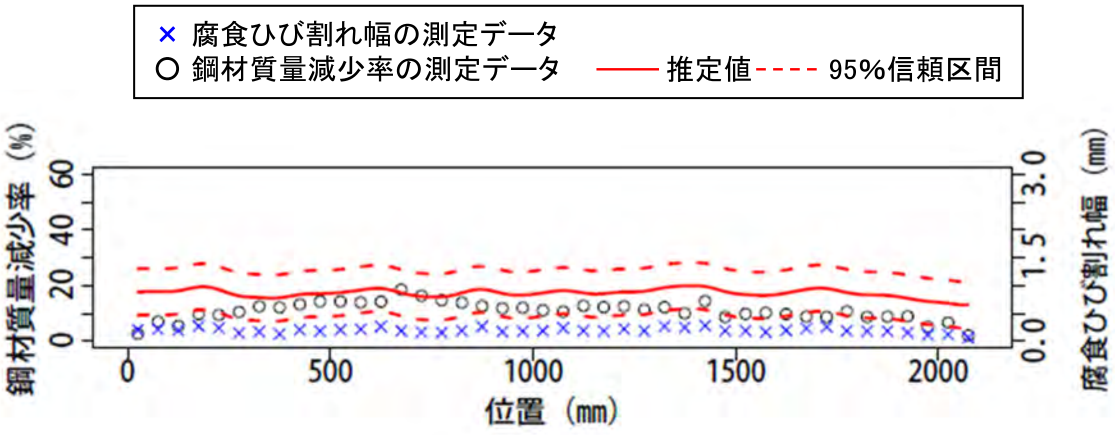


供試体 No.7

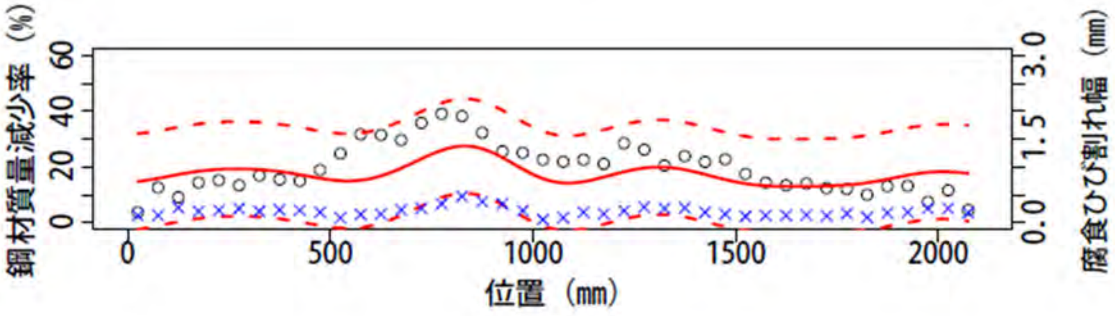


供試体 No.8

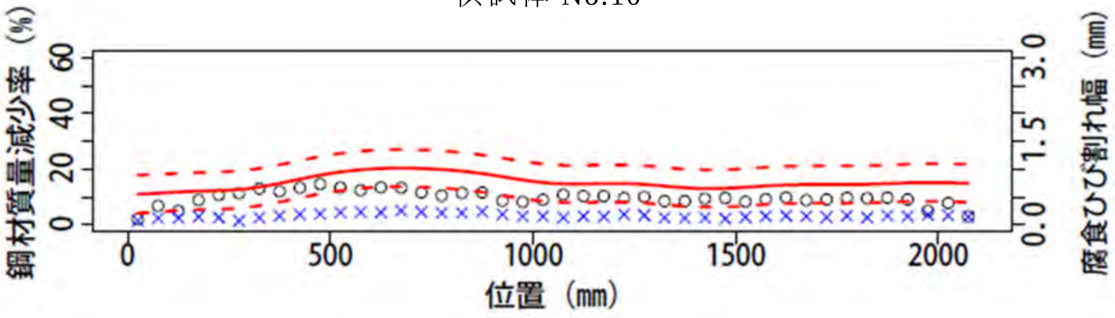
図 4-14(2) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Gaussian（観測量誤差あり）



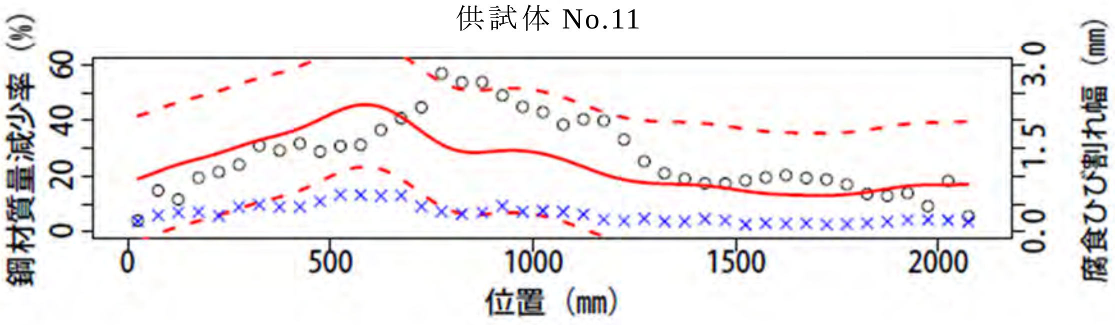
供試体 No.9



供試体 No.10

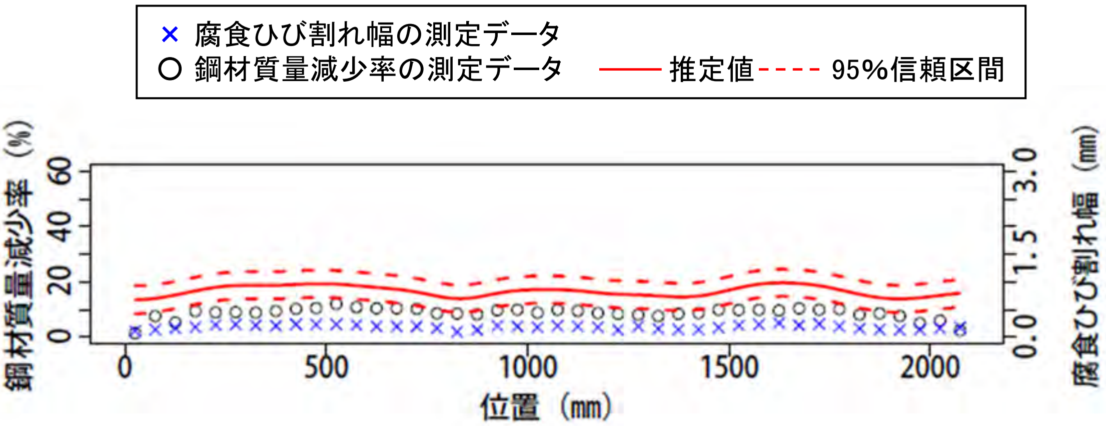


供試体 No.11

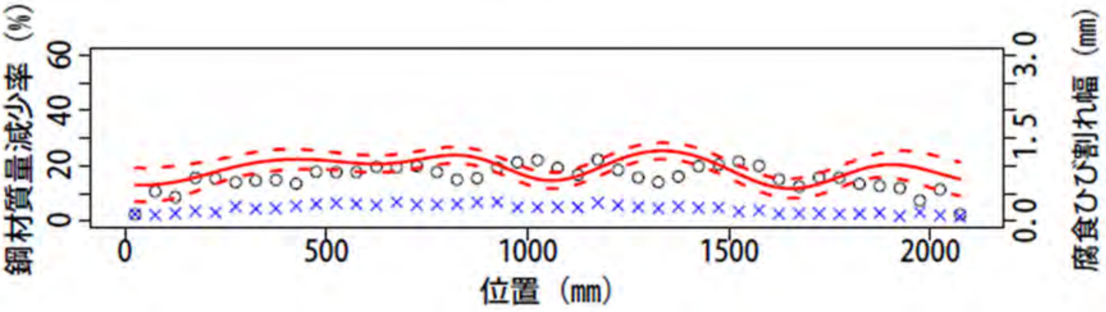


供試体 No.12

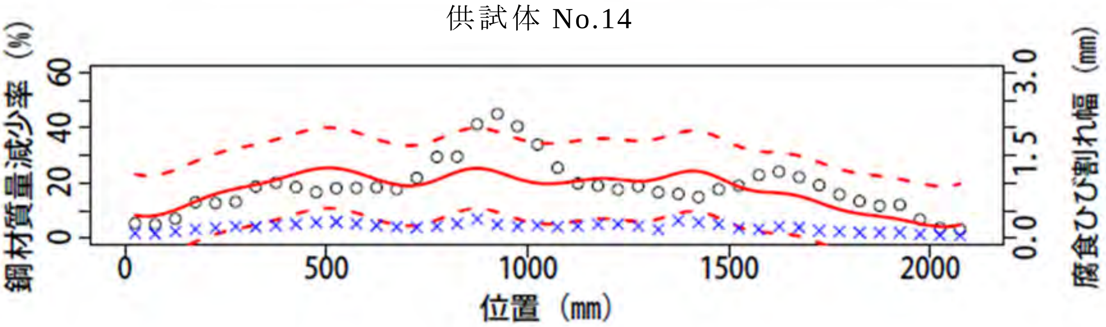
図 4-14(3) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Gaussian（観測量誤差あり）



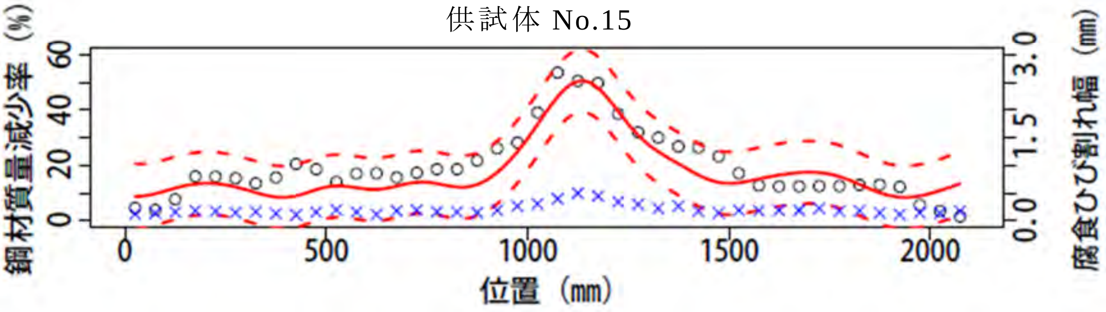
供試体 No.13



供試体 No.14

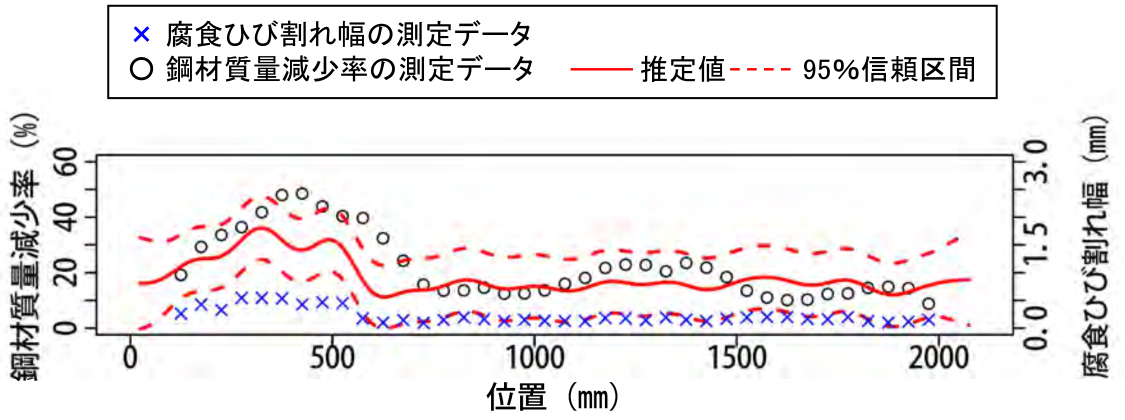


供試体 No.15

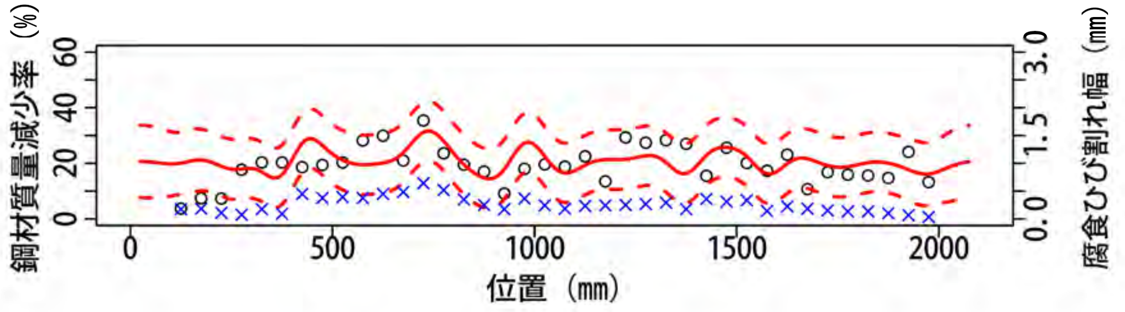


供試体 No.16

図 4-14(4) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Gaussian（観測量誤差あり）



供試体 No.17



供試体 No.18

図 4-14(5) 腐食ひび割れ幅から推定した鋼材質量減少率
Gaussian（観測量誤差あり）

4.4.4 鋼材質量減少率の確率場のパラメータ設定

本検討では，実験データから腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関係数や鋼材質量減少率の確率場のパラメータ（標準偏差や SOF）を実験データから算出したが，実務ではこれらについて何らかの方法で推定する必要がある．相関係数，鋼材質量減少率の標準偏差，SOF と腐食ひび割れ幅のパラメータとの関係を図 4-15 から図 4-17 に示す．図 4-15 によれば相関係数は平均腐食ひび割れ幅に依存せずほぼ一定の値となっており，平均値は 0.57 である．

図 4-16 は，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の標準偏差の関係を図示したものである．左側が相互相関相関として Markovian（観測量誤差なし）を用いた場合，右側は Gaussian（観測量誤差あり）を用いた場合の結果である．いずれの場合においても，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の標準偏差には相関が見られる．図 4-17 は腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の SOF の関係を示しており，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の標準偏差の関係と同様に両者の間には相関が見られる．今後，多くの腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の関係についてのデータを収集できれば，それらを分析することにより，腐食ひび割れ幅の情報から鋼材質量減少率の標準偏差や SOF を想定できる可能性があると考える．

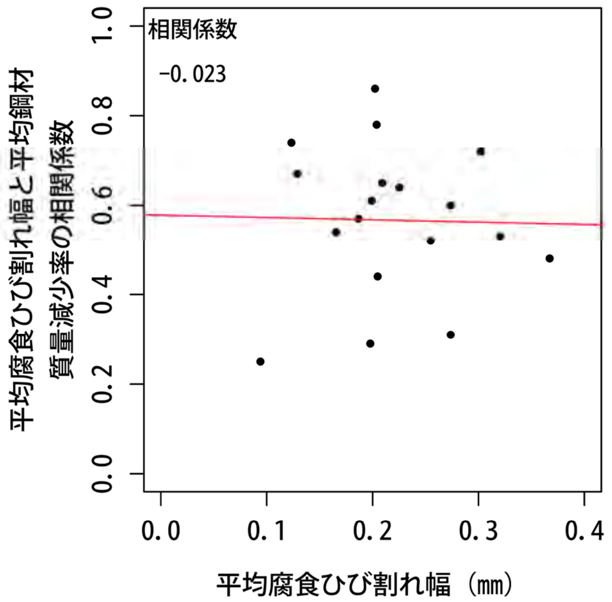
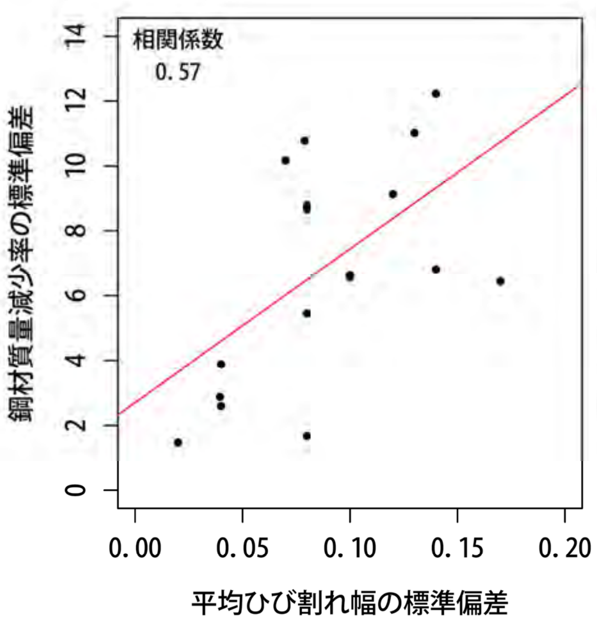
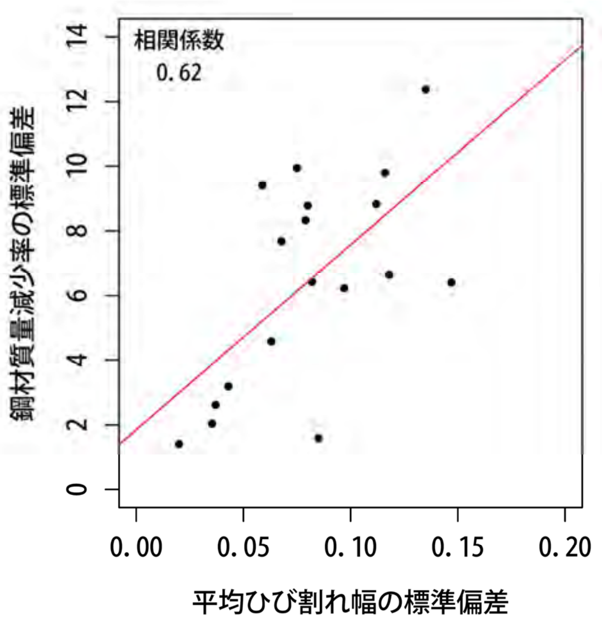


図 4-15 平均腐食ひび割れ幅と相関係数

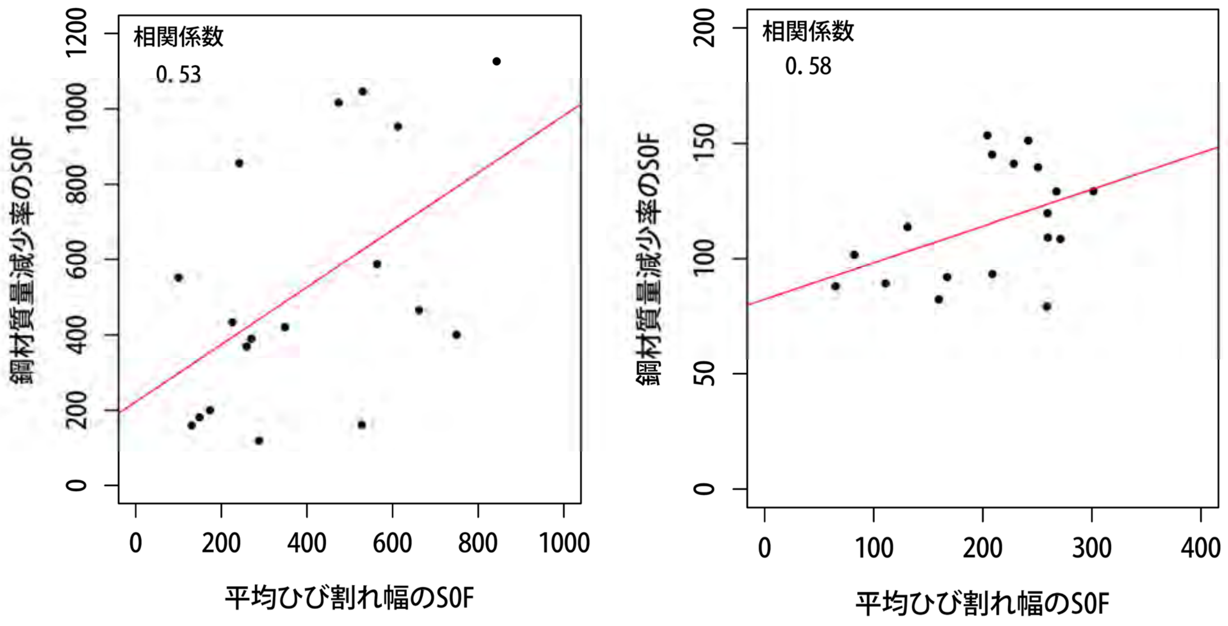


Markovian（観測量誤差なし）



Gaussian（観測量誤差あり）

図 4-16 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の標準偏差



Markovian（観測量誤差なし）　Gaussian（観測量誤差あり）

図 4-17 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の SOF

4.5 まとめ

本章では，確率場に基づく方法であり，推定される空間分布の信頼幅，すなわち不確定性の大きさも定量的に評価することができる GPR を用いて腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率の空間分布推定を行う方法を検討した．検討には，腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の空間分布情報が詳細に得られている既往の実験データを用いた．平均腐食ひび割れ幅に基づく平均鋼材質量減少率の推定には 3 章で設定した推定式を用いた．本章のまとめを以下に示す．

1) 既往の実験に用いられた 18 体のコンクリート供試体で測定した腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相関関係を求めたところ，相関係数は概ね 0.6 であった．相関係数の最小は 0.25，最大は 0.86 であった．

2) 腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の相互相関を分析した. 関数モデルを使わずに実験データのみからノンパラメタリックに相互相関関数の設定を試みたところ, 使用した実験データではデータ数が不十分で, 適切な相互相関関数の算定は困難であった. 地盤工学などの分野で広く利用される自己相関関数モデルを関数形として用いて相互相関関数を求めたところ, 関数形が固定されているため安定した形を設定することができた.

3) 関数形を用いた相互相関関数の設定では, 自己相関関数である Markovian モデルと Gaussian モデルを用いた．確率場のパラメータの算定には最尤法を用いた．両モデルに対して観測量誤差の有無の影響を, 腐食ひび割れ幅の空間分布推定をとおして確認したところ，Markovian モデルでは観測量誤差を考慮しない方が，Gaussian モデルでは観測量誤差を考慮した方が推定の適合性は良好であった．そこで，関数形に Markovian モデル（観測量誤差なし），Gaussian モデル（観測量誤差あり）を用いて相互相関関数を設定した.

4) 設定した 2 つの相互相関関数を用いて腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率の推定を実施した．曲線の滑らかさ等には相違があるものの，両者とも推定された鋼材質量減少率の分布傾向は類似していた．18 供試体のうち約 8 割は概ね良好な推定ができた.

5) 本検討では, 鋼材質量減少率の確率場のパラメータを実験データから直接算出した

が, 実務での利用を想定した場合には腐食ひび割れ幅からこれらを推定する必要がある．腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の標準偏差および SOF には相関が見られた．今後，多くのデータより両者の関係を分析できれば，腐食ひび割れ幅の情報から鋼材質量減少率の標準偏差や SOF を推定できると考える.

参考文献（第 4 章）

1) Rasmussen.C.E, Williams.C.K.I : Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press, 2006.
2) 持橋大地，大羽成征：ガウス過程と機械学習，　講談社，2019.
3) 富澤幸久，吉田郁政，大竹雄：ガウス過程回帰を用いた複数の地盤物性値間の相関を考慮した空間分布推定，AI・データサイエンス論文集，J2 号，2 巻，pp.617-625，2021.
4) 吉田郁政，黒瀬浩公，福井史郎：確率論に基づく逆解析手法の基礎検討，土木学会論文集，Vol.483，No.1-26，pp.61-68，1994.
5) 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1993.
6) Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K.K. and Ching, J. : Scale of Fluctuation for Spatially Varying Soils : Estimation Methods and Values, ASCE-ASME J.Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A Civil Engineering, 6(4), 2020.
7) Vanmrck.E : Random Fields And Systems, pp.193-194, World Scientific Publishing corporation, 2010.
8) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究，土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.631-649, 2008.

第5章 腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の現状評価

5.1 はじめに

第 3 章では腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係について検討した．第 4 章では，第 3 章の成果を用いて空間分布の推定手法について検討した．本章では，第 3 章および第 4 章の成果を踏まえて，腐食ひび割れ幅の空間分布から既設 RC 構造物の安全性評価を行うことによって定量的な現状評価を行う方法について検討した．既設桟橋を対象として，空間分布推定にはガウス過程回帰（GPR），信頼性手法にはモンテカルロ・シミュレーションを用いて，腐食ひび割れ幅から定量的に既設 RC 構造物の現状評価する方法について具体化した．

5.2 評価方法

5.2.1　信頼性評価手法

信頼性評価では，損傷確率（または破壊確率）P_f を，損傷モード（または破壊モード）i の性能関数 $Z_i=g_i(\boldsymbol{X})$を用いて次のように定義される．

$$\begin{aligned} P_{fi} &= P(Z_i \leq 0) \\ &= P(\mathrm{g}_i(X_1, X_2, \cdots, X_n) \leq 0) \end{aligned} \tag{5.1}$$

したがって，損傷確率 P_f は，確率変数 X_1，X_2，・・・，X_n の結合確率密度関数を用いて，次式で算定される．

$$P_f = \underset{Zi \leqq 0}{\iint \cdots \int} f_{X_1, X_2, \cdots, X_n}(x_1, x_2, \cdots, x_n) dx_1, dx_2, \cdots, dx_n \tag{5.2}$$

信頼性評価は，各変数がとりうるあらゆる値とそれらの値の組み合わせを考えて，そのうちで性能関数を満足しない割合を求めて損傷確率を評価する手法と言える．ただし，各変数は変数の持つ確率統計的特性を満足するように選ぶ必要がある．

本検討では信頼性評価手法としてモンテカルロ・シミュレーション（Monte Carlo

Simulation, 以後 MCS と記す）を用いる. MCS では, コンピュータで乱数を発生させ, 十分な数のサンプルを抽出して数値実験的に損傷確率(または破壊確率)を算定する. 損傷確率 P_f は，式(5.3)および式(5.4)により近似的に与えられる [2].

$$P_f = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{i=1}^{N_{MC}} I_F\left(g^{(i)}\right) \tag{5.3}$$

$$I_F\left(\mathrm{g}^{(i)}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } g^{(i)} \leq 1 \\ 0 & \text{if } g^{(i)} > 1 \end{cases} \tag{5.4}$$

ここに，N_{MC} : 試行回数

$g^{(\mathrm{i})}$: i 番目の限界状態関数の値

上記式の近似の精度は試行回数 N_{MC} に依存し，試行回数を多くすれば多くするほど精度は向上し，試行回数 N_{MC} の平方根に比例する．MCS の精度の目安となる損傷確率 P_f の変動係数 COV は式(5.5)より算定できる.

$$COV = \sqrt{\frac{1 - P_f}{P_f N_{MC}}} \tag{5.5}$$

5.2.2　信頼性評価手法を用いた既設 RC 構造物の現状評価方法

図 5-1 に腐食ひび割れ幅から既設 RC 構造物の定量的な現状評価方法のフローを示す．はじめに，対象構造物の形状，設計変数および腐食ひび割れ幅情報などの検討条件を設定する. 設計変数は各変数の統計的特性を把握する. 腐食ひび割れ幅の情報は, ひび割れ調査などの測定結果に基づき設定する．別途，信頼性解析による現状評価を行う上で必要となる限界状態を定義する.

断面耐力の算定に必要な鉄筋量は GPR を用いて算定する. 腐食ひび割れ幅の空間分布より鋼材質量減少率の空間分布を推定し，その結果に基づいて現状の鉄筋量を設定する. 信頼性解析には MCS を用いて, 発生断面力と断面耐力の算定結果より限界状態確率を算定し，現状評価を行う.

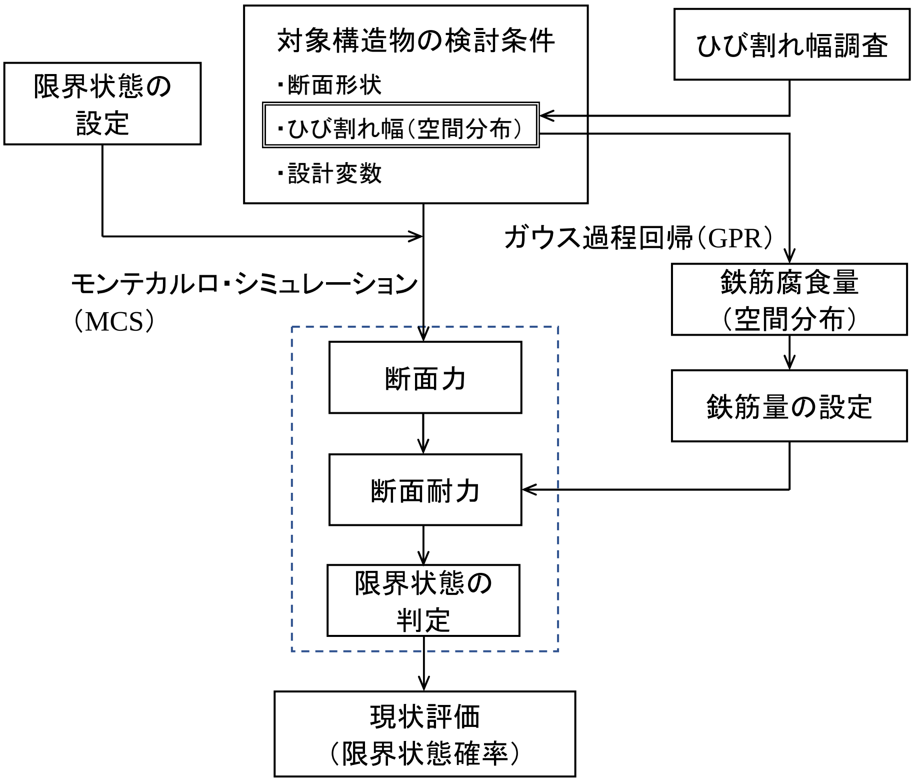


図 5-1 腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の現状評価フロー

5.3 検討モデルおよび検討条件

5.3.1 検討モデル

図 5-2 に実際の既設桟橋を参考に設定した検討モデルに用いる主桁の断面形状を示す．断面形状は T 型で幅 2000mm，高さ 1800mm である．使用したコンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2，梁の下端部に主鉄筋 D29（SD345）が 2 段に 6 本ずつ配筋されている．部材底版からの鉄筋かぶりは 50mm，縦方向の鉄筋間隔は 50mm，横方向は 90mm である．主桁のスパン長は 23m で，主桁に作用する荷重は図 5-3 に示すように等分布に分布する．

5.3.2 検討モデルの安全性に対する設計計算

5.3.1 で設定した検討モデルに対して安全性に関する照査を行った．照査はコンクリート標準示方書 曲げモーメントおよび軸方向力に対する照査 [3)]に準拠するとともに，コンクリート構造の限界状態設計法 [4)]を参照して算定した．なお，安全性の関する照査は，発生断面力（曲げモーメント）最大となる主桁中心 x=11.5m で実施した．

発生断面力 M_d（発生曲げモーメント）の算定

$$M_x = \frac{ql^2}{2}\left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2}\right) \tag{5.6}$$

ここに，M_x：位置 x における曲げモーメント

q：等分布荷重

l：スパン長

設計荷重は荷重値 w に荷重係数 γ_f=1.2 を乗じて q=46×1.2=55.2kN/m とする．

x/l=1/2，l=23.0m，q=25.2kN/m を式(5.6)に代入すると，

$$M_d = M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{55.2 \times 23.0^2}{8} = 3650\ kNm$$

終局耐力 M_{ud}（曲げモーメント）の算定

終局耐力の算定には式(5.7)から式(5.11)を用いる．

$$M_{ud} = A_s f_y d\left(1 - \frac{k_2}{k_1 k_3}\frac{p f_y}{f_c'}\right)/\gamma_b \tag{5.7}$$

$$k_1 = 1 - \frac{\varepsilon_0'}{3\varepsilon_u'} \tag{5.8}$$

$$k_2 = 1 - \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon_0'}{\varepsilon_u'}\right)^2 /6}{2k_1} \tag{5.9}$$

$$k_3 = 1 - 0.003f_{ck}' \quad \leq 0.85 \tag{5.10}$$

$$\varepsilon_u' = \frac{155 - f_{ck}'}{30000} \qquad 0.0025 \leq \varepsilon_u' \leq 0.0035 \tag{5.11}$$

ここに，M_{ud}：抵抗力

As：鉄筋の断面積

f_y：鉄筋の降伏強度

d：部材の有効高さ

p：鉄筋比（=A_s/bd），b：部材幅

f'_c：コンクリートの圧縮強度

γ_b：部材係数

k_3：強度の低減係数

ε_0'：コンクリートのピーク強度時のひずみ(=0.002)

ε_u'：コンクリートの終局圧縮ひずみ

式(5.10)および式(5.11)に f'_{ck}=24N/mm^2 を代入すると，

$$k_3 = 1 - 0.003 \times 24 = 0.928 \qquad \text{となり} \quad k_3 = 0.85$$

$$\varepsilon_u' = \frac{155 - 24}{30000} = 0.00436 \qquad \text{となり} \quad \varepsilon_u' = 0.0035$$

式(5.8)に $\varepsilon_u' = 0.0035, \varepsilon_0' = 0.002$ を代入すると，

$$k_1 = 1 - \frac{0.002}{3 \times 0.0035} = 0.81$$

式(5.9)に $\varepsilon_u' = 0.0035, \varepsilon_0' = 0.002, k_1 = 0.81$ を代入すると，

$$k_2 = 1 - \frac{1 - \left(\frac{0.002}{0.0035}\right)^2 /6}{2 \times 0.81} = 0.416$$

したがって，式(5.7)は，

$$M_{ud} = A_s f_y d \left(1 - \frac{0.416}{0.81 \times 0.85} \frac{p f_y}{f_c'}\right) / \gamma_b = A_s f_y d \left(1 - \frac{0.6 p f_y}{f_c'}\right) / \gamma_b \tag{5.12}$$

となる．

耐力の計算に式(5.12)を用いる場合，中立軸 x が T 型断面のフランジ部にある必要がある．そこで，式(5.13)を用いて中立軸 x の位置を確認した．

$$A_s f_y = bx\left(1-\frac{\varepsilon'_0}{3\varepsilon'_u}\right)f'_{ck} = bxk_1k_3f'_c \tag{5.13}$$

$$A_s = 12 \times D29 = 12 \times 6.424 = 77.1cm^2 = 7710mm^2$$

$$f_y = f_{yk}/\gamma_s = 345/1.0 = 345N/mm^2 \quad \gamma_s = 1.0$$

$$b = 2000mm$$

$$f'_c = f'_{ck}/\gamma_c = 24/1.3 = 18.5N/mm^2 \quad \gamma_c = 1.3$$

を式(5.13)に代入すると

$$7710 \cdot 345 = 2000 \cdot 0.81 \cdot 0.85 \cdot 18.5x$$

$$x = \frac{7710 \cdot 345}{2000 \cdot 0.81 \cdot 0.85 \cdot 18.5} = 104.4mm < 200mm$$

となるため，式(5.12)を用いて耐力を算定した．

$$d = 1800 - \frac{50+100}{2} = 1725mm, b = 2000mm$$

$$p = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{7710}{1725 \times 2000} = 0.0022$$

$$\gamma_b = 1.1$$

なので，

$$M_{ud} = 7710 \cdot 345 \cdot 1725\left(1-\frac{0.6 \cdot 0.0022 \cdot 345}{18.5}\right)/1.1 = 4068 \times 10^6 Nmm = 4068kNm$$

となる．

したがって，照査値は M_d/M_{ud}=3650/4068=0.90<1.0 となり照査を満足する．

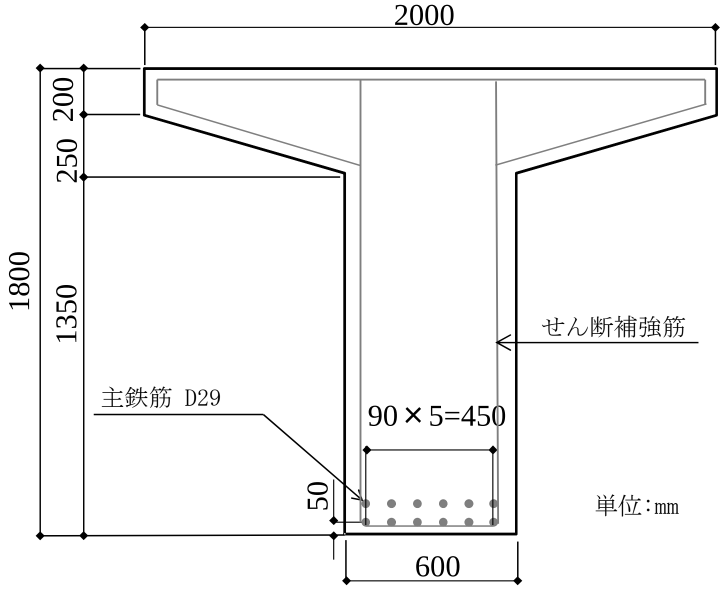


図 5-2 対象とする桟橋の主桁の断面形状

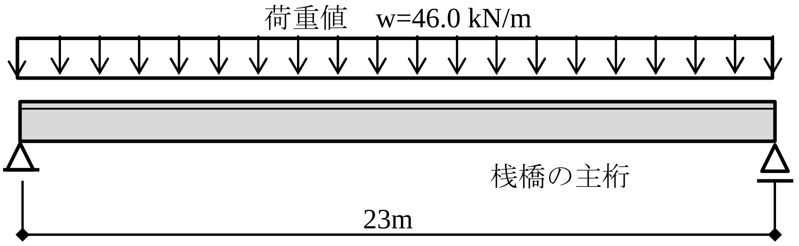
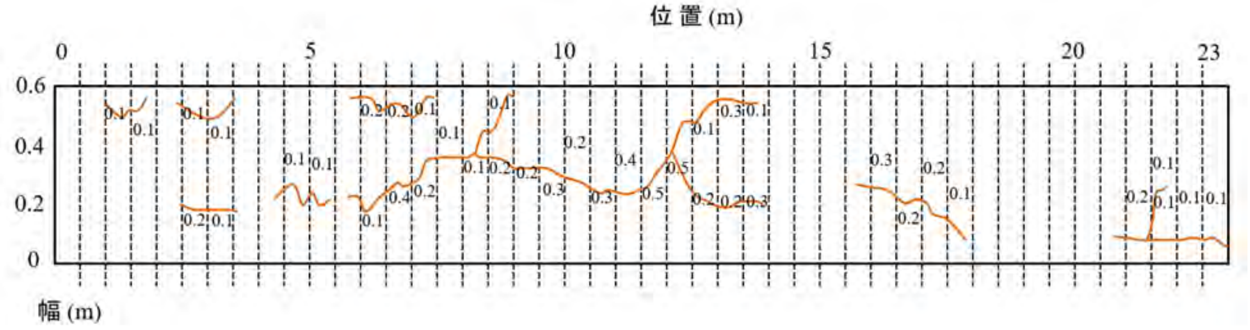


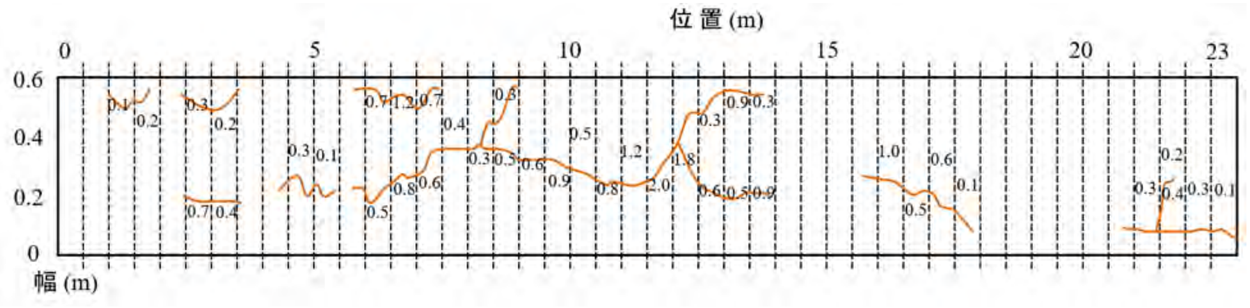
図 5-3 主桁に作用する設計荷重

5.3.3 腐食ひび割れ幅の空間分布

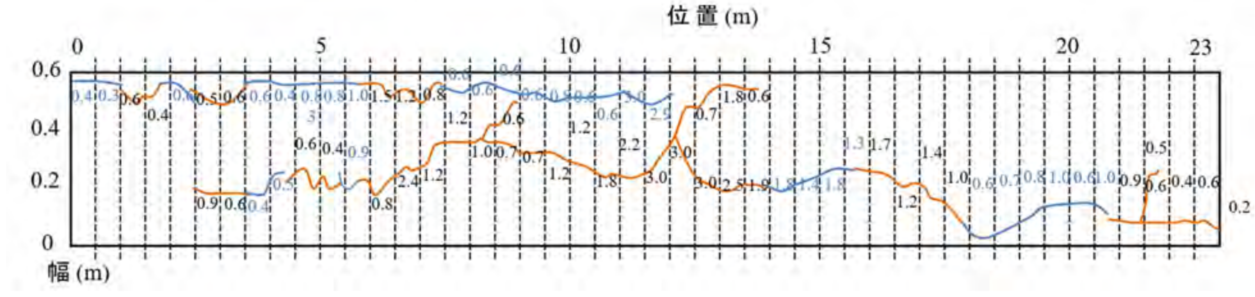
対象とする桟橋の真下は海面であり，桟橋の底面に腐食ひび割れが発生している場合，それらは構造物の下から見上げて確認される．ここでは状態の異なる 3 つの観測情報，すなわち，腐食ひび割れ幅を設定して検討を実施した．図 5-4 に設定した 3 ケースの腐食ひび割れ幅の発生状況を示す．ケース 1 では腐食ひび割れ幅の大きさが全体的に小さく，まだあまり劣化が進行していない状態を想定した．ケース 2 ではケース 1 より腐食ひび割れが進行している状態を，ケース 3 はかなり腐食ひび割れが進行している状態を想定した．これらの腐食ひび割れ幅を 0m から 23m まで 0.5m 間隔で 47 地点に分割し，断面ごとの合計値を算出して観測量ベクトル **z** とした．図 5-5 に 3 ケースそれぞれ断面ごとの腐食ひび割れの合計値を示す．ケース 2 ではケース 1 の約 3 倍，ケース 3 では約 10 倍の腐食ひび割れ幅を想定している．



ケース 1

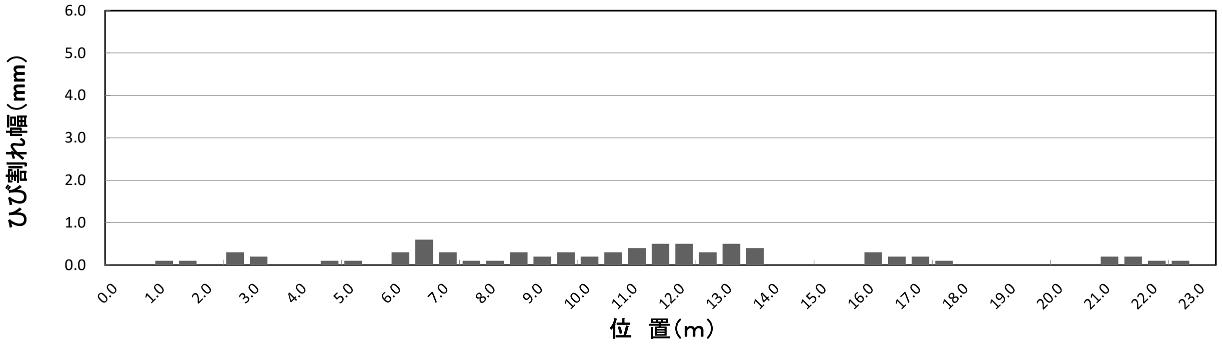


ケース 2

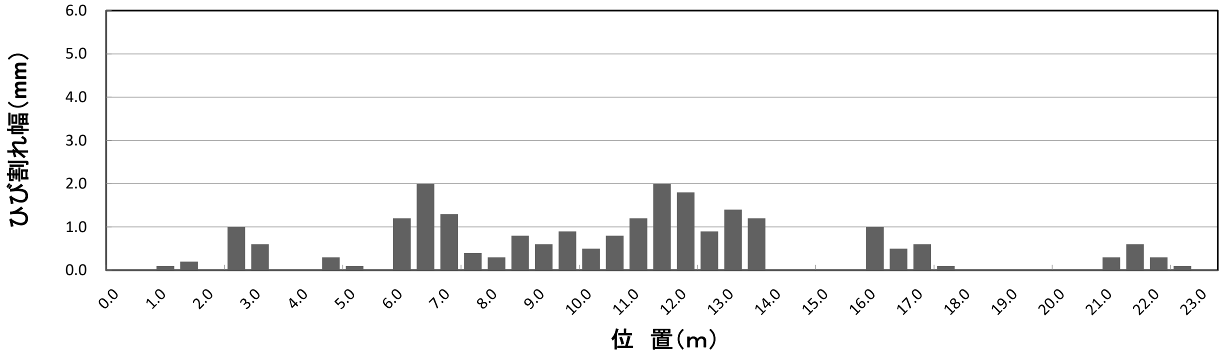


ケース 3

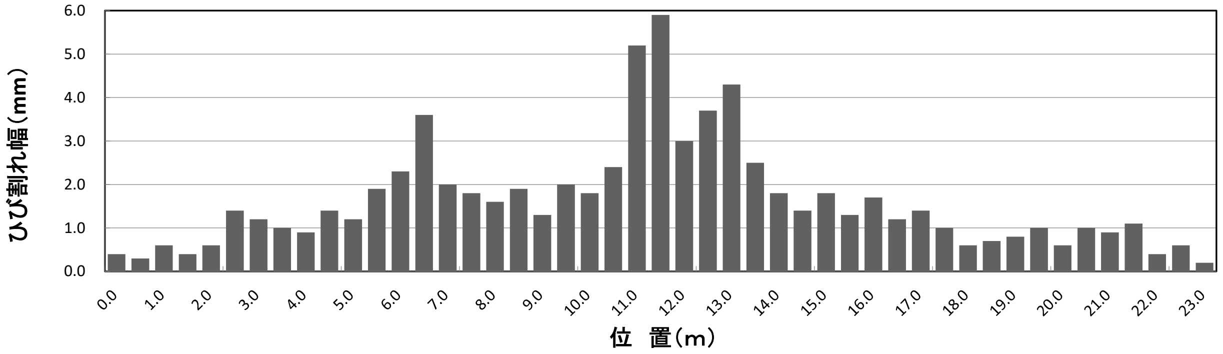
図 5-4 設定した 3 ケースの腐食ひび割れ発生状況



ケース 1



ケース 2



ケース 3

図 5-5 断面ごとに算出した腐食ひび割れ幅の合計値

5.3.4 設計変数の不確定性

信頼性解析を用いて主桁の健全性を評価するに当たり，設計変数の不確定性を設定した．不確定性を考慮した設計変数を表 5-1 に示す．耐力計算に対して，RC コンクリートの材料特性としてコンクリート強度，鉄筋の降伏強度を考え，「鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針(案)・同解説」[5)]および千田ら[6)]の研究に基づいて設定した．終局耐力算定式については，武山ら[7)]の研究に基づいた．施工性に関しては，かぶりの施工誤差に着目した秋山ら[8)]の論文に基づいて設定した．一方，作用荷重については，設計計算の断面力を算定する際に用いた荷重係数 γ_f=1.2 が設計値に平均値を下回る確率が 5％以下になるような余裕代を与えるものと考え，変動係数 V=0.2/1.65=0.12 とした．信頼性解析では，これらの設計変数を全て空間方向に完全相関と仮定して解析を実施した．

表 5-1　設計変数の不確定性一覧表

<table>
<tr><th colspan="3">不確定要因</th><th>平均値
（μ）</th><th>標準偏差
（σ）</th><th>変動係数
（CV）</th><th>確率分布</th></tr>
<tr><td rowspan="2">構造物の
材料特性</td><td>コンクリート
設計基準強度
24（N/mm^2）</td><td>圧縮強度
（N/mm^2）</td><td>31.0</td><td>3.15</td><td>0.10</td><td>正規分布</td></tr>
<tr><td>鉄筋 SD345</td><td>降伏強度
（N/mm^2）</td><td>390</td><td>19.3</td><td>0.05</td><td>正規分布</td></tr>
<tr><td>耐力
算定式</td><td colspan="2">曲げ終局耐力　（kNm）</td><td>1.0×
計算値</td><td>0.11μ</td><td>0.11</td><td>正規分布</td></tr>
<tr><td>施工性</td><td>鉄筋かぶり</td><td>施工誤差
（mm）</td><td>58.5</td><td>16.6</td><td>0.28</td><td>正規分布</td></tr>
<tr><td>作用荷重</td><td colspan="2">上載荷重＋自重（kN/m）</td><td>46.0</td><td>0.12μ</td><td>0.12</td><td>正規分布</td></tr>
</table>

5.4 現状評価に対する限界状態の定義

5.4.1　限界状態の定義

現状評価に対する限界状態は，5.3.2 の安全性に対する設計計算と同様に，主桁に発生する断面力に対して曲げ耐力が超過する状態とする．5.3.2 において用いた計算式を基本とするが，その際，設計で考慮した材料，部材および荷重に対する部分安全係数は排除して用いる．式(5.14)に発生断面力の算定式を，式(5.15)に曲げ耐力の算定式を示す．

限界状態の判定に当たっては，式(5.16)に示すように発生断面力と終局耐力の比である安全率 FS を用いる．0m から 23m までの梁の全スパンにおいて，0.5m 間隔の 47 地点について算出し，全算定箇所のうち 1 箇所でも安全率が 1.0 を下回れば限界状態を超過すると判定する．

発生断面力の算定式

$$M_d = \frac{ql^2}{2}\left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2}\right) \tag{5.14}$$

ここに，M_d：発生断面力（曲げモーメント）

x：照査する位置

q：等分布荷重

l：スパン長

曲げ耐力の算定式

$$M_{ud} = A_s f_y d\left(1 - \frac{0.6pf_y}{f'_c}\right) \tag{5.15}$$

ここに，M_{ud}：曲げ耐力

As：鉄筋の断面積

f_y：鉄筋の降伏強度

d：部材の有効高さ

p：鉄筋比（$=A_s/bd$）

b：部材幅

f'_c：コンクリートの圧縮強度

安全率の算定式

$$FS = \frac{M_{ud}}{M_d} \tag{5.16}$$

ここに，FS：安全率

M_d：発生断面力

M_{ud}：曲げ耐力

5.4.2 鋼材質量減少率および平均物性を用いた場合の安全率

表 5-1 に示した各設計変数の平均値を用いて鋼材質量減少率と安全率の関係を確認した．なお，安全率は，発生断面力が最も大きくなる部材中央で算定した．以下に，健全な場合，つまり鋼材質量減少率 0％の場合の算定を示す．

発生断面力の算定

x/l=1/2，l=23.0m，q=55.2kN/m を式(5.14)に代入すると，

$$M_d = \frac{ql^2}{8} = \frac{46.0 \times 23.0^2}{8} = 3042\ kNm$$

曲げ耐力の算定

$$A_s = 12 \times D29 = 12 \times 6.424 = 77.1cm^2 = 7710mm^2$$

$$f_y = 390N/mm^2$$

$$d = 1800 - \frac{58.5 + 108.5}{2} = 1716.5mm$$

$$b = 2000mm$$

$$p = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{7710}{1725 \times 2000} = 0.0022$$

$$f_c' = 31N/mm^2$$

上記の値を式(5.15)に代入すると，

$$M_{ud} = A_s f_y d \left(1 - \frac{0.6pf_y}{f_c'}\right) = 7710 \cdot 390 \cdot 1716.5 \left(1 - \frac{0.6 \cdot 0.0022 \cdot 345}{31}\right)$$

$$= 4498 \times 10^6 Nmm = 5086kNm$$

したがって，安全率 FS は，

$$FS = \frac{M_{ud}}{M_d} = \frac{5086}{3042} = 1.67$$

となる．同様にして，鋼材質量減少率を 50%まで変化させて安全率を算定した．その結果を図 5-6 に示す．鋼材質量減少率 40%のとき，安全率 FS は 1.0 となった．

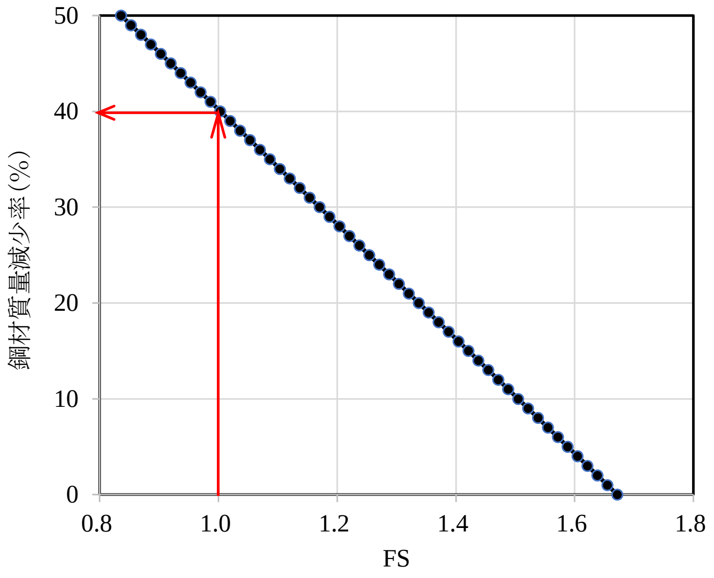
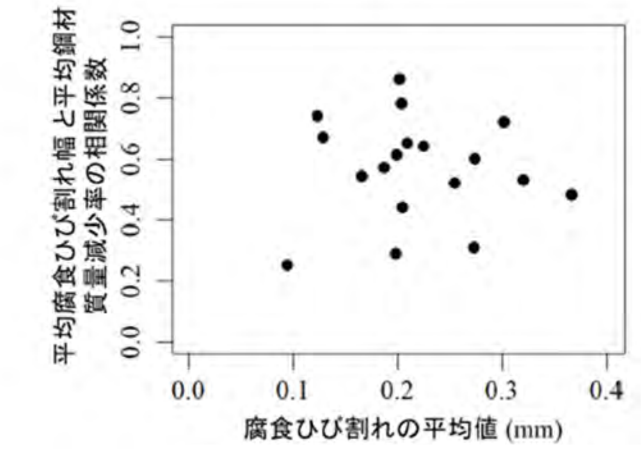


図 5-6 安全率と鋼材質量減少率の関係

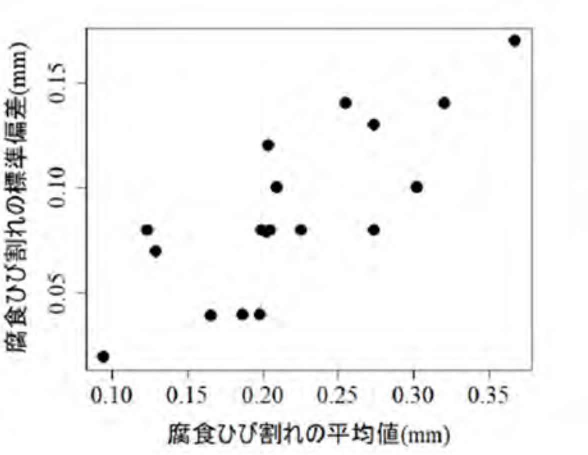
5.5 鋼材質量減少率の算定方法

第 4 章で検討した鉄筋腐食量の空間分布推定では，実験結果から鋼材質量減少率が得られるため，相関係数や鋼材質量減少率の確率場のパラメータ（標準偏差，SOF）を式(4.19)に示した負の対数尤度より推定し，計算に使用した．しかし，実問題を対象にした場合，第 4 章での検討に用いた実験結果のように，密に鋼材質量減少率の空間分布が得られることは一般に困難である．点検より得られた腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率の空間分布の推定を行う際，相関係数や鋼材質量減少率の確率場のパラメータ（標準偏差，SOF）を決める必要がある．

本検討では，鋼材質量減少率の SOF は腐食ひび割れ幅から推定した SOF と同じ値を採用する．第 4 章で用いた 18 供試体の実験結果について，平均腐食ひび割れ幅と平均鋼材質量減少率の関係を図 5-7 の左図に示す．両者には相関性が見られ，相関係数がおよそ 0.6 であったため，以降の検討では相関係数として 0.6 を用いる．また，腐食ひび割れ幅の平均とその標準偏差の関係を図 5-7 の右図に示す．両者には線形の関係が見られ平均値に比例して標準偏差が大きくなる，すなわち変動係数一定の傾向が見られる．そこで，変動係数を 0.4 と仮定した．相互相関関数には，第 4 章での腐食ひび割れ幅に対する推定の適合性の良さから Markovian（観測量誤差なし）を用いた．鋼材質量減少率の空間分布の事後の平均値ベクトルおよび共分散行列は 4 章の定式化において示した式(4.13)および式(4.15)より与えられる．このときの事前の平均ベクトルは，第 3 章で検討した腐食ひび割れ幅に基づく鋼材質量減少率の推定式である式(3.9)から算定した．推定式に用いるカテゴリーデータの回帰係数を表 5-2 に示す．なお，推定式自体も不確定性を有しているため，そのばらつきも考慮した．これらに基づき発生させたサンプル実現値を用いて MCS を実施した．



平均ひび割れ幅と平均鋼材質量減少率の相関係数の関係



腐食ひび割れ幅とその標準偏差の関係

図 5-7 4 章で用いた実験結果に基づく各供試体の腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率のパラメータの関係

表 5-2 カテゴリーデータの回帰係数

腐食方法の係数 β_1	暴露	0.6
鉄筋種類の係数 β_2	異形鉄筋	1.0
せん断補強筋の有無の係数 β_3	あり（一部）	2.4
鉄筋配置の係数 β_4	タイプC	1.1

5.6 限界状態確率の算定

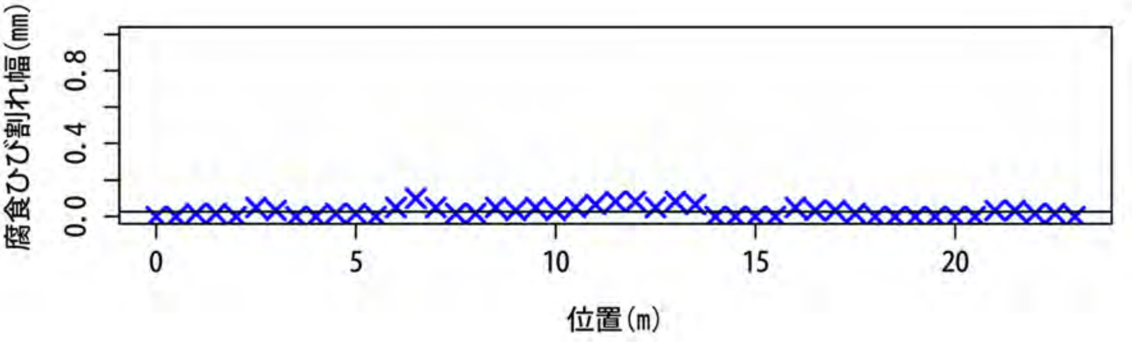
5.3.3 で設定した 3 ケースの腐食ひび割れ幅条件に対する限界状態確率を算定する前に，健全な状態，すなわち鋼材質量減少率 0%の場合の限界状態確率の算定を行った．10 万回の試行回数で MCS を実施したところ，限界状態確率は P_f=1.24×10^{-3} であった．

3 ケースの腐食ひび割れ幅条件に対する限界状態の算定においても，試行回数 10 万回で MCS を実施した．図 5-8 はケース 1 を対象とした推定結果である．(a)は想定した腐食ひび割れ幅，(b)は鋼材質量減少率の空間分布について発生された 10 万サンプルのランダム実現値，およびその平均と 95%信頼幅を示している．同図では 10 万回のサンプルを図示しているため詳細な空間分布の特徴は重ね書きによって確認できないため，(c)MCS で発生させた 20 サンプルのみを図化した．(d)は式(5.16)より算定した 10 万サンプルについて地点ごとの安全率を示している．ケース 1 では鋼材質量減少率の空間の変動は少なく，安全率の分布はスムーズな曲線となっている．

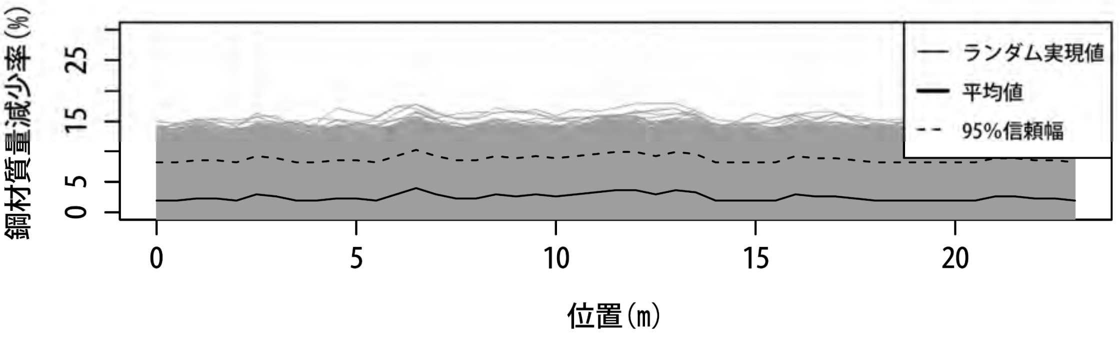
図 5-9 に，ケース 1 と同様にケース 2 に対する推定結果を示す．(b)および(c)によれば，ケース 1 に比べれば鋼材質量減少率の空間の変動が少し確認できる．しかし，(d)に示した安全率の分布は，個別の曲線の一部には多少凹凸が見られるものの，同図に示した平均値はスムーズな曲線である．図 5-10 に，ケース 3 に対する推定結果を示す． (b)および(c)によれば，鋼材質量減少率の空間の変動が，ケース 1 および 2 に比べて顕著に確認できる．(d)に示した安全率分布では，個別の曲線だけでなく，平均値を示す曲線にも少し凹凸が確認できる．鋼材質量減少率の空間の変動が顕著に表れているケース 3 においても安全率分布が比較的滑らかな曲線になる理由としては，表 5-1 に示した不確定性を有する設計変数の影響が空間分布の変動に対して相対的に大きいため，鋼材質量減少率の空間変動の特徴があまり明確に現れなかったと考える．

表 5-3 に腐食ひび割れ幅に関する 3 つのケースに対して算定した平均鋼材質量減少率，限界状態確率およびその変動係数を示す．健全な状態に対する限界状態確率およびその変動係数も併せて示した．限界状態確率は健全な状態，ケース 1，2 および 3 とひび割れ幅が大きくなるにつれて，1.24×10^{-3}，2.38×10^{-3}，3.16×10^{-3} および 1.02×10^{-2} と大きくなり，ケース 3 の限界状態確率は，健全な状態の 10 倍程度であった．

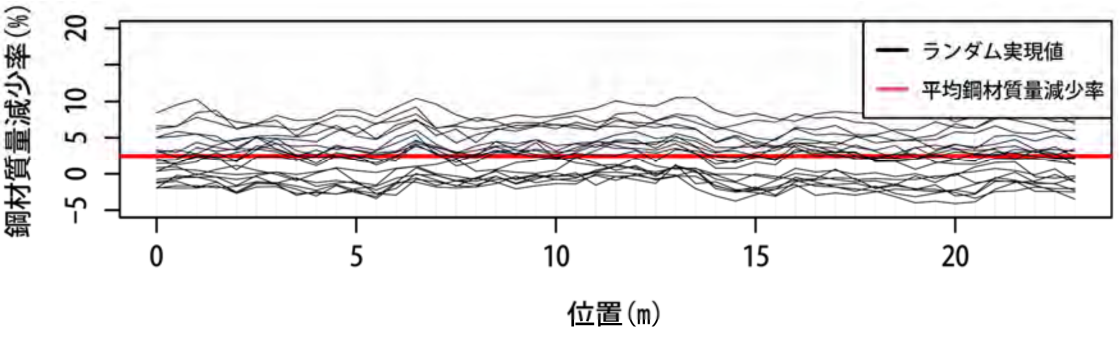
本手法を用いることにより，これまで定性的な評価に用いられてきた腐食ひび割れ幅情報から安全性の指標である限界状態確率の形で，定量的な現状評価が行えることを示すことができた．本手法を用いることにより腐食ひび割れ情報の維持管理への有効活用が図れるものと考える．



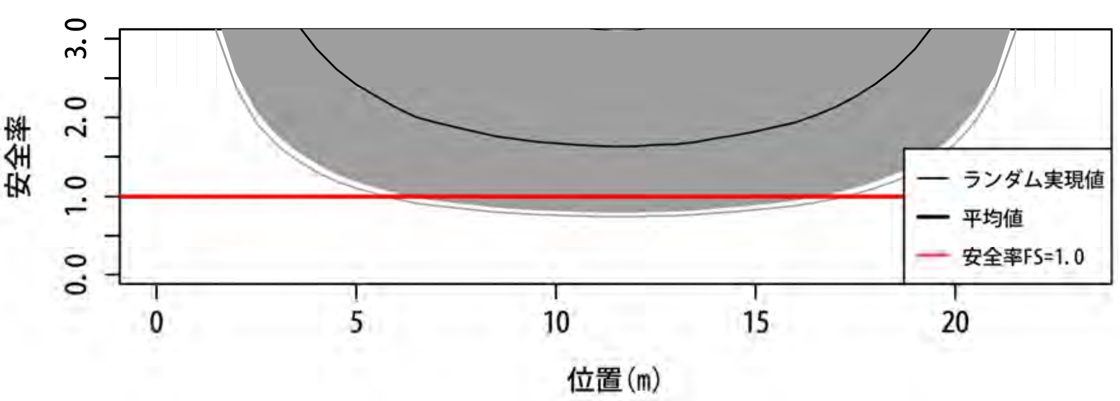
(a) 腐食ひび割れ幅



(b) 鋼材質量減少率の 10 万サンプルのランダム実現値
およびその平均と 95%信頼幅

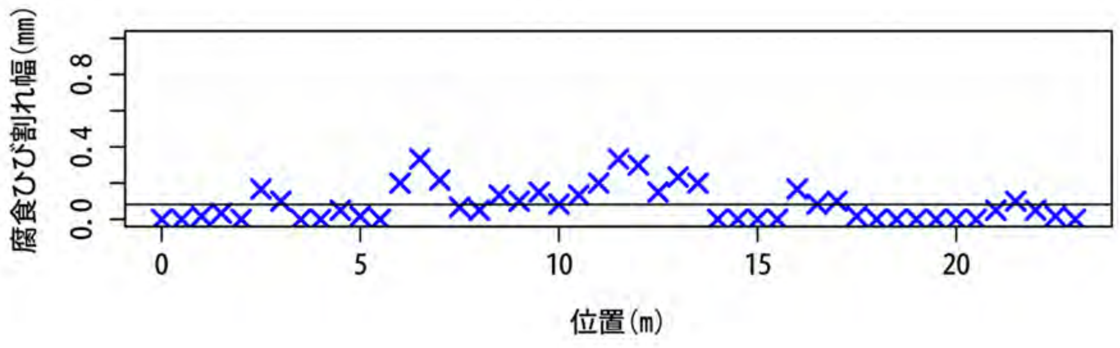


(c) 鋼材質量減少率の 20 サンプルのランダム実現値

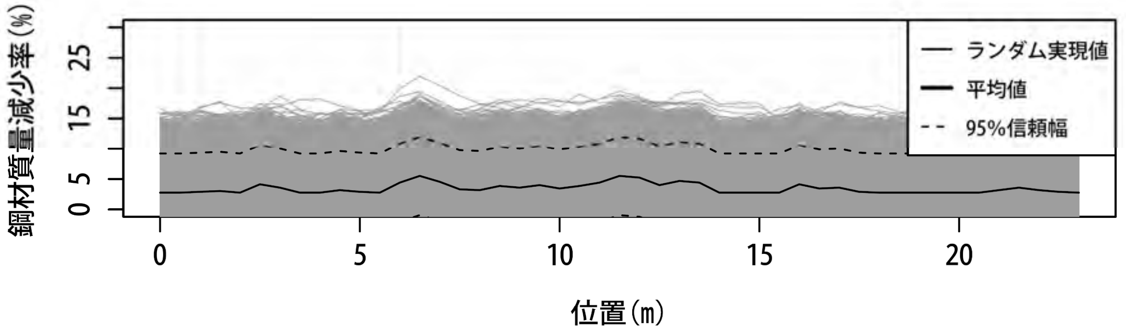


(d) 安全率分布図

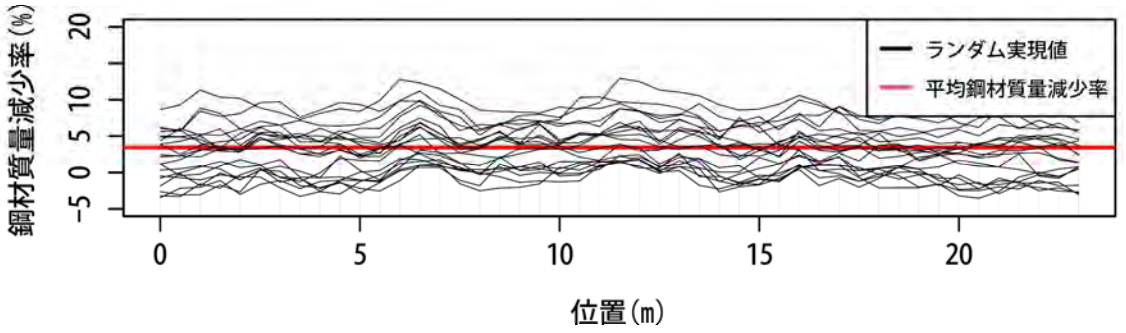
図 5-8 ケース 1 を対象とした推定結果



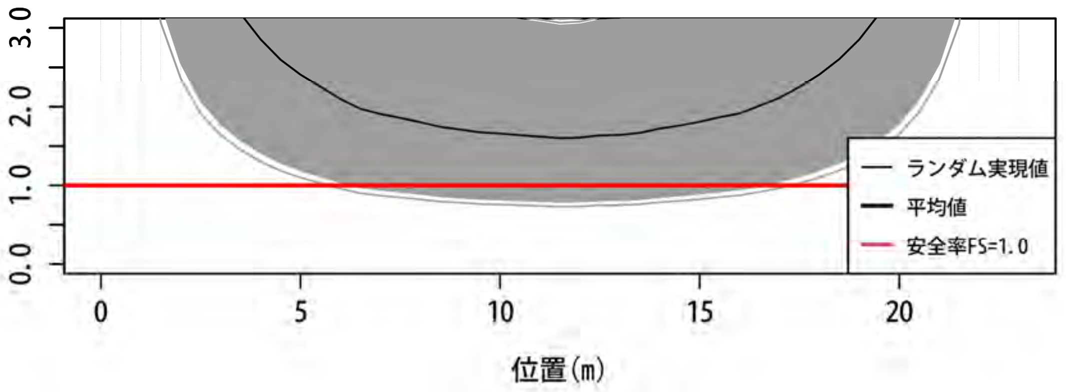
(a) 腐食ひび割れ幅



(b) 鋼材質量減少率の 10 万サンプルのランダム実現値
およびその平均と 95%信頼幅

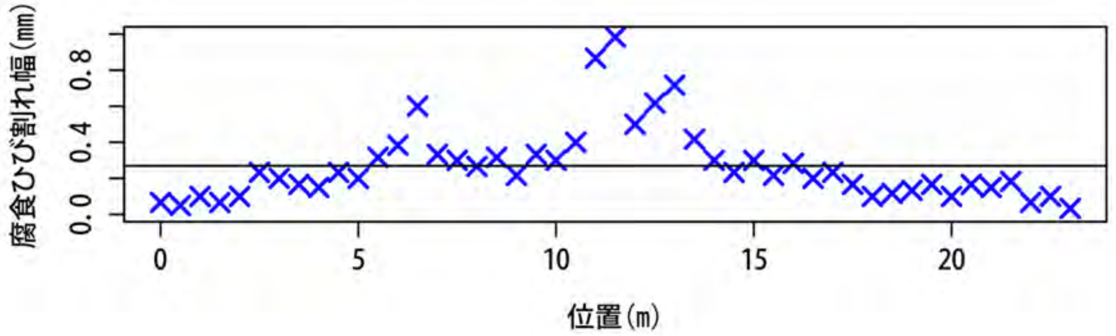


(c) 鋼材質量減少率の 20 サンプルのランダム実現値

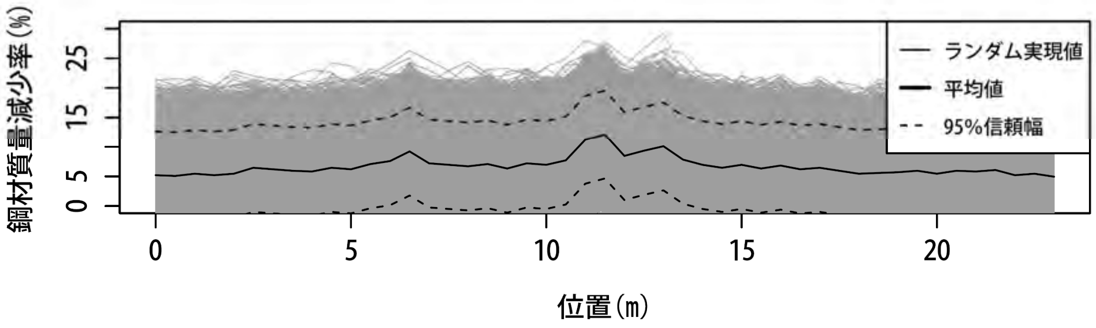


(d) 安全率分布図

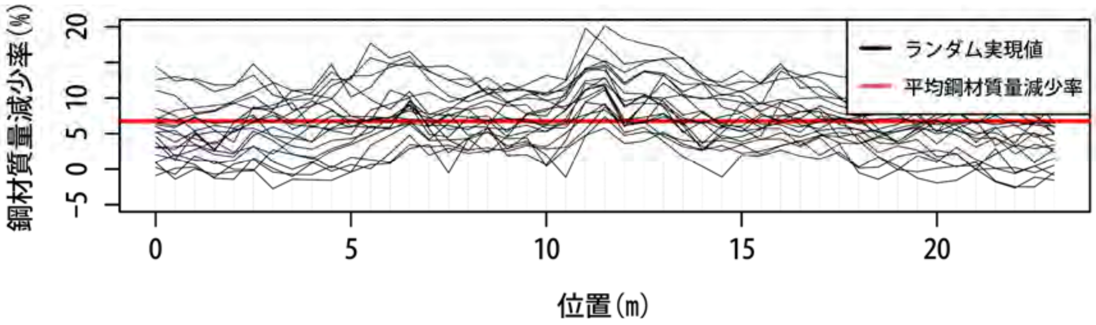
図 5-9 ケース 2 を対象とした推定結果



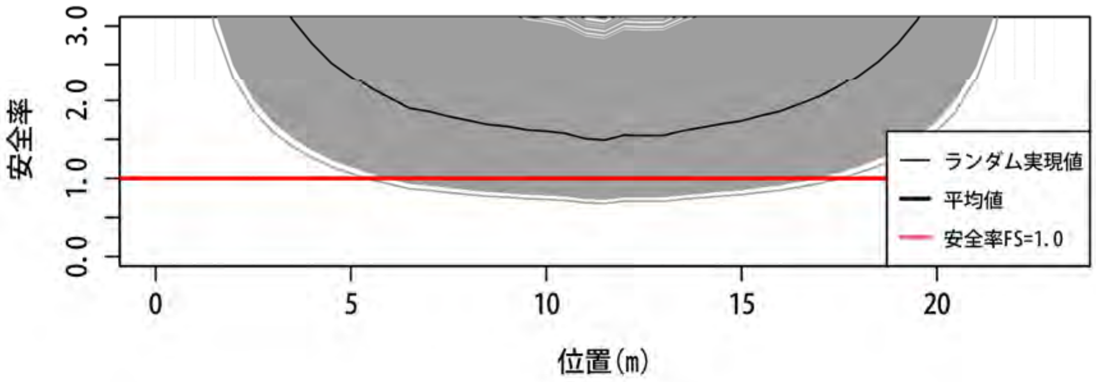
(a) 腐食ひび割れ幅



(b) 鋼材質量減少率の 10 万サンプルのランダム実現値
およびその平均と 95%信頼幅



(c) 鋼材質量減少率の 20 サンプルのランダム実現値



(d) 安全率分布図

図 5-10 ケース 3 を対象とした推定結果

表 5-3 各ケースの鋼材質量減少率の推定および限界状態確率の算定結果

	健全な状態	ケース1	ケース2	ケース3
腐食ひび割れ幅の平均値（mm）	―	2.69×10^{-2}	8.19×10^{-2}	2.69×10^{-1}
平均鋼材質量減少率（%）	―	2.47	3.43	6.73
限界状態確率	1.24×10^{-3}	2.38×10^{-3}	3.16×10^{-2}	1.02×10^{-2}
限界状態確率の変動係数	0.090	0.065	0.056	0.031

5.7　まとめ

本章では，信頼性手法を用いて，腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の安全性を評価することによる定量的な現状評価方法の検討を行った．腐食ひび割れ幅から限界状態確率を算定する方法を提案するとともに，既設桟橋を対象とした試計算により提案手法を具体化した．本章のまとめを以下に示す．

1) 腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の現状評価方法を検討するにあたり，既設桟橋の主桁部を取り上げ，検討モデルおよび検討条件を設定した．

2) 現行の安全性に関する照査方法を踏まえて限界状態を定義した．発生断面力と終局耐力の比である安全率 FS を用い，桟橋の全長において設定した安全率の算定箇所のうち 1 箇所でも安全率が 1.0 を下回れば限界状態を超過すると判定することにした．

3) 腐食ひび割れ幅の空間分布から鋼材質量減少率の空間分布の推定には，4 章で検討した相互相関を考慮したガウス過程回帰（GPR）を用い，ある点の推定値だけでなく，その周辺の値との相関を考慮して推定した．

4) 限界状態確率の算定では，信頼性手法としてモンテカルロ・シミュレーション（MCS）を用いた．そして，本提案手法を用いることにより，腐食ひび割れ幅の空間分布より既設 RC 構造物の現状を，限界状態確率として定量的に評価できることを示した．

参考文献（第 5 章）

1) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
2) 関根智明，高橋磐郎，若山邦紘：OR ライブラリー20 シミュレーション，日科技連，1976.
3) 土木学会：2017 年制定　コンクリート標準示方書 [設計編]，2017．.
4) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版株式会社，1978.
5) 鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針(案)・同解説,日本建築学会：pp.41-47，1997.
6) 千田富男，石橋忠良，山崎安弘：鉄筋の品質に関する調査，研究，土木学会第 36

回年次学術講演会講演概要集，pp.1-2，1981.

7) 武山康，鈴木基行，戸谷有一：構造変数の変動性の実態調査と耐力評価に関する研究，土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集，pp7- 8，1981.

8) 秋山充良，伊藤祐香，鈴木基行：塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究，土木学会論文集 E, Vol.62 No.2, pp.385-401, 2006.

第6章 結論および今後の方向性

6.1 結論

既設 RC 構造物の点検・調査では，一般的に，構造物表面の腐食ひび割れの長さ，幅，剥離・剥落の程度，錆汁の有無等の把握が行われる．RC 構造物の代表的な経年劣化の 1 つに塩害がある．塩害の場合，腐食ひび割れ幅および長さは，鉄筋腐食と密接な関係にある定量的な観測情報である．現状では，一旦，定性的な情報に置き換えて既設構造物の健全度評価に用いられており，有効な活用方法とは言い難い．腐食ひび割れ幅および鉄筋腐食は非常にばらつきが大きいという問題を抱えている．しかし，信頼性手法の枠組みで，腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定を行えば，ばらつきを適切に考慮した現状評価の定量化を図ることが可能になると考え，本研究を実施した．

第 3 章　鉄筋腐食量の推定式の検討

多くの鉄筋腐食実験データを収集して鉄筋腐食データベースを作成した．作成した鉄筋腐食データベースを用いて腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式について検討した．既往の文献調査で提案されている腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式の適合性について確認を行い,その結果を踏まえて推定式の基本形状を設定した．さらに，カテゴリーデータの相違を考慮できるように推定式の基本形状を拡張した．既往の推定式と比較して様々な条件に対して定量的な鉄筋腐食量の推定が可能となった．また，信頼性手法の枠組みで推定式を用いることを踏まえ，提案式のばらつきについて分析した．

4 章　鉄筋腐食量の空間分布推定

確率場に基づく方法であり，推定される空間分布の信頼幅，すなわち不確定性の大きさも定量的に評価することができる GPR を用いて腐食ひび割れ幅から鋼材質量減少率の空間分布推定を行う方法を検討した．検討には腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率の空間分布情報が詳細に得られている既往の実験データを用いた．相互相関関数の設定には，代表的な自己相関関数である Markovian モデルおよび Gaussian モデルを用いた．平均腐食ひび割れ幅に基づく平均鋼材質量減少率の推定には 3 章で設定した推

定式を用いた．その結果，曲線の滑らかさ等には相違があるものの，いずれのモデルを用いても 18 供試体のうち約 8 割の供試体で腐食ひび割れ幅の空間分布より良好な鋼材質量減少率の空間分布推定を行うことができた．

第 5 章　腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の現状評価

腐食ひび割れ幅に基づく既設 RC 構造物の安全性を評価することによる定量的な現状評価方法の検討を行った．腐食ひび割れ幅から限界状態確率を算定する方法を提案するとともに，既設桟橋を対象とした試計算により提案手法を具体化した．腐食ひび割れ幅の空間分布から鋼材質量減少率の空間分布の推定には，4 章で検討した相互相関を考慮したガウス過程回帰（GPR）を用い，ある点の推定値だけでなく，その周辺の値との相関を考慮して推定した．限界状態確率の算定では，信頼性手法としてモンテカルロ・シミュレーション（MCS）を用いた．そして，本提案手法を用いることにより，腐食ひび割れ幅の空間分布より既設 RC 構造物の現状を，限界状態確率として定量的に評価できることを示した．

6.2 今後の方向性

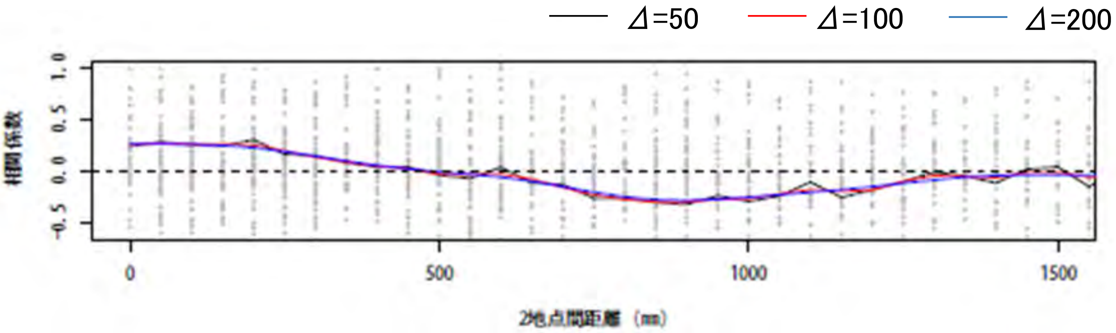
本研究では,腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定式の検討から始めて,次に,腐食ひび割れ幅の空間分布から鉄筋腐食量の空間分布推定に関する検討を実施した.それらの検討成果を踏まえて，空間分布推定手法と信頼性解析手法を用いて，腐食ひび割れ幅の空間分布から既設 RC 構造物の安全性評価を行うことによる定量的な現状評価方法の検討を実施した.

しかし，既設構造物の維持管理を行う上では，既設構造物の現状評価も重要であるが，将来予測をすることも非常に重要である．既設構造物の点検及び調査に基づく現状評価と将来予測,この 2 つの要素から総合的に維持管理計画を立てるのが望ましい.したがって，今後は，本研究で示した現状評価と同様に，腐食ひび割れ情報より定量的に将来予測を行う方法およびその具体化を図りたい.

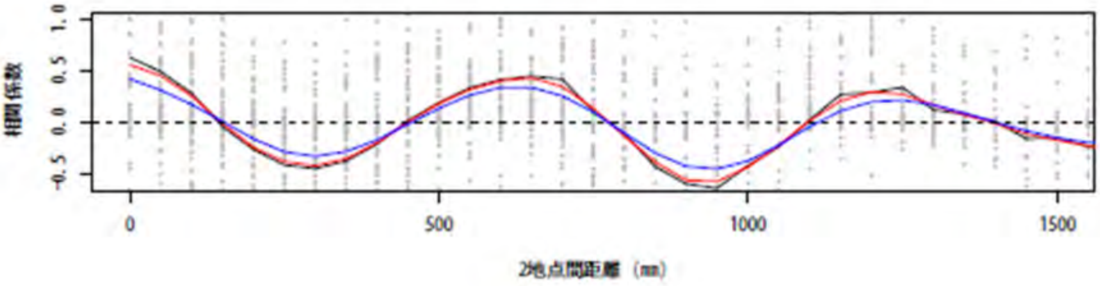
本研究と同様に信頼性手法の枠組みの中で，将来予測手法としてデータ同化の代表的な手法である Particle Filter の導入を考えている．しかし，それと並行して劣化予測モデルについて検討しなければならない．本研究の第 2 章でも触れたが，鉄筋腐食が要因となる RC 構造物の劣化予測モデルでは，鉄筋の腐食速度がとても重要なパラメータとなる.これまでにも研究が行われてきたが,いまだオーソライズされていない.また，そのばらつきについても検討する必要がある．この 2 つの課題を解決して将来予測手法を確立したいと考える.

最後に，本研究をとおして感じたデータ収集・分析の在り方について少し触れておきたい．これまでの信頼性手法では，対象とする構造物の性能的に弱い箇所等に着目して，その構造物の破壊（または損傷）について議論されることが多かったように思う．本研究では，鉄筋腐食量は GPR を用いて空間分布推定を行っているが，他の設計パラメータの空間方向への不確定性は完全相関と仮定して MCS を実施した.しかし,他の設計パラメータも,鉄筋腐食と同様に,空間的な相関を考慮するのが理想である.近年,技術の飛躍的な進歩に伴い膨大なデータの収集および分析が可能となっている.単にコンクリート強度等の材料物性の分布状態を整理するだけでなく，空間的な情報も含めて収集・分析が行われると，より信頼性の高い評価が可能になると感じた.

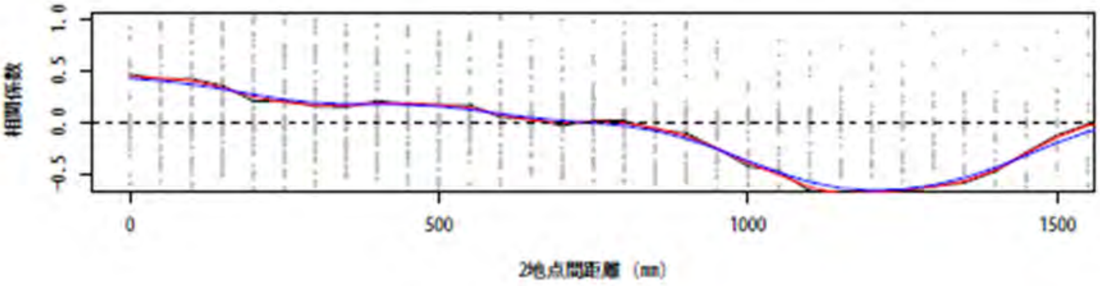
付録−Ⅰ　腐食ひび割れ幅と鋼材質量減少率との相互相関



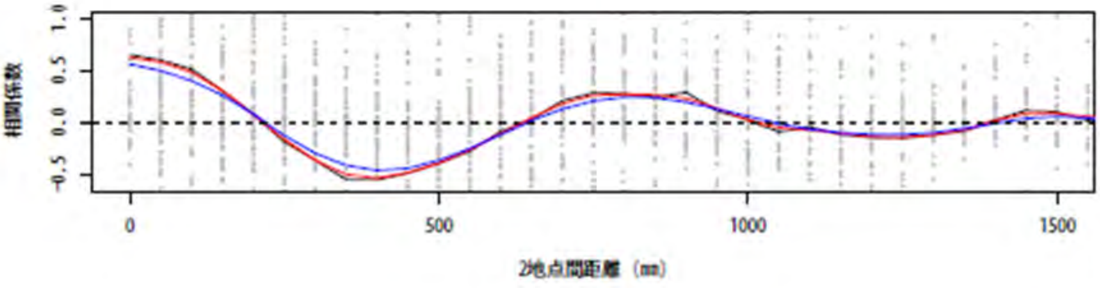
供試体 No.1



供試体 No.2

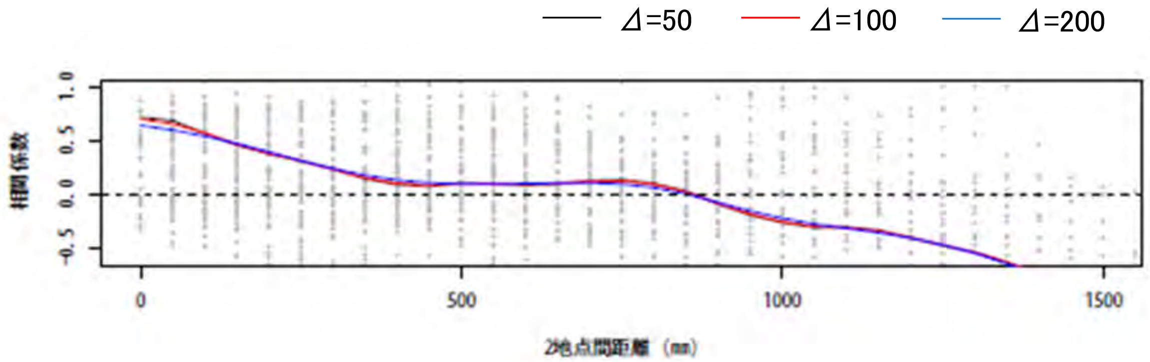


供試体 No.3

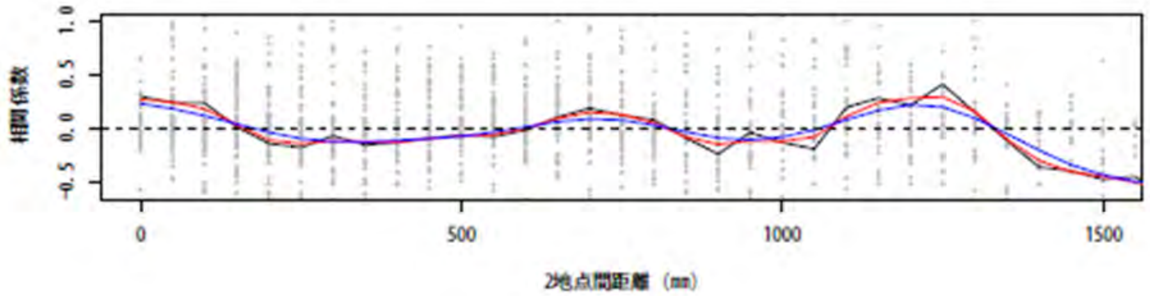


供試体 No.4

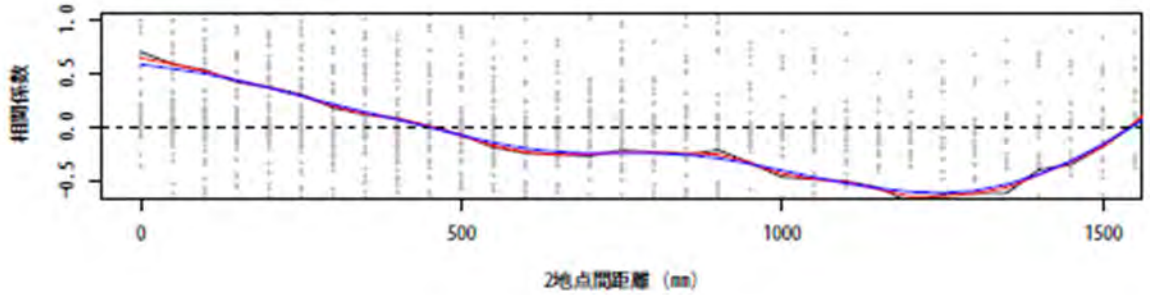
自己相関関数モデル未使用



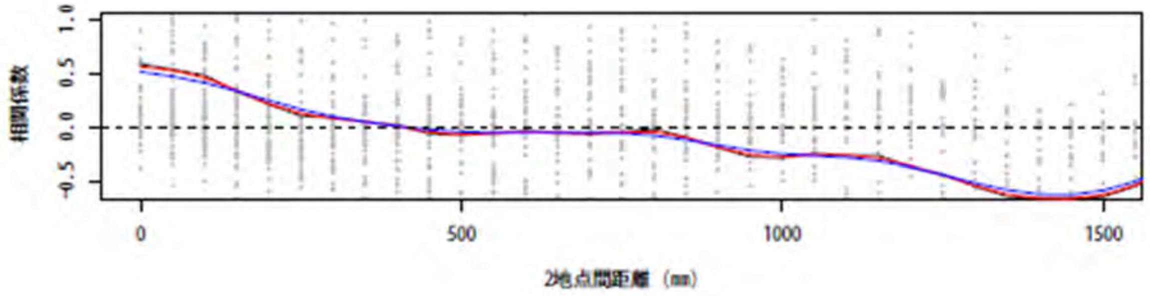
供試体 No.5



供試体 No.6

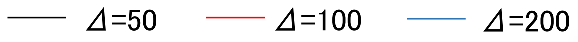


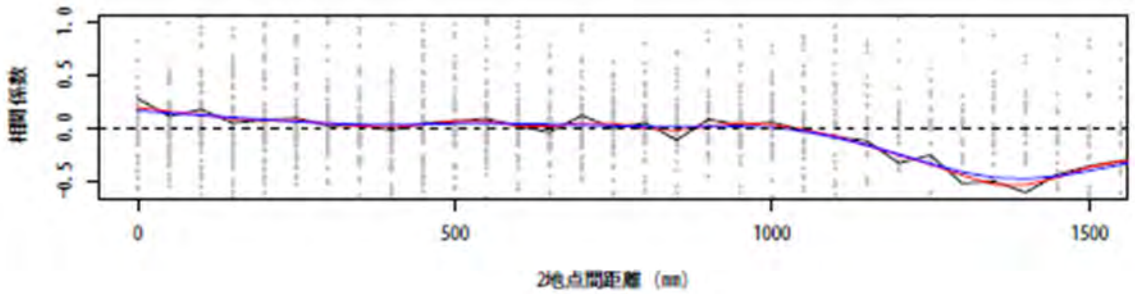
供試体 No.7



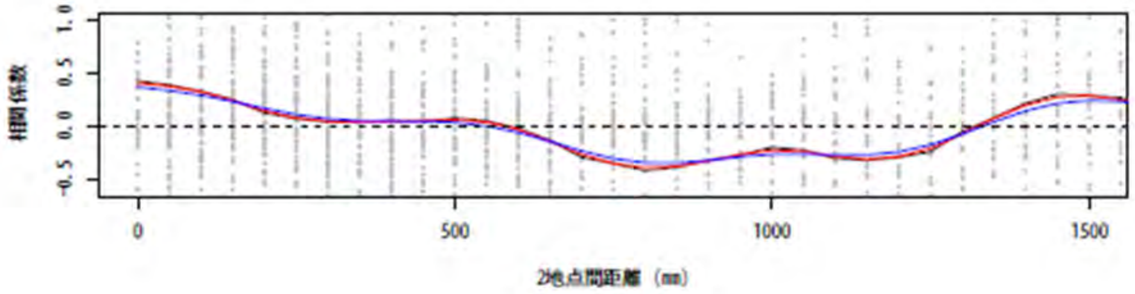
供試体 No.8

自己相関関数モデル未使用

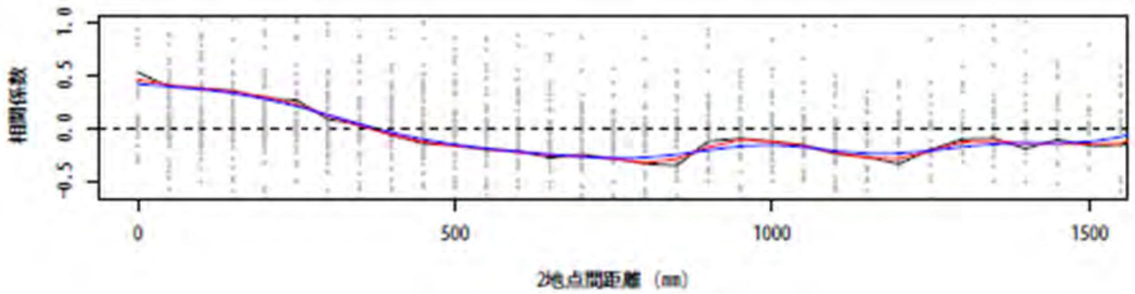




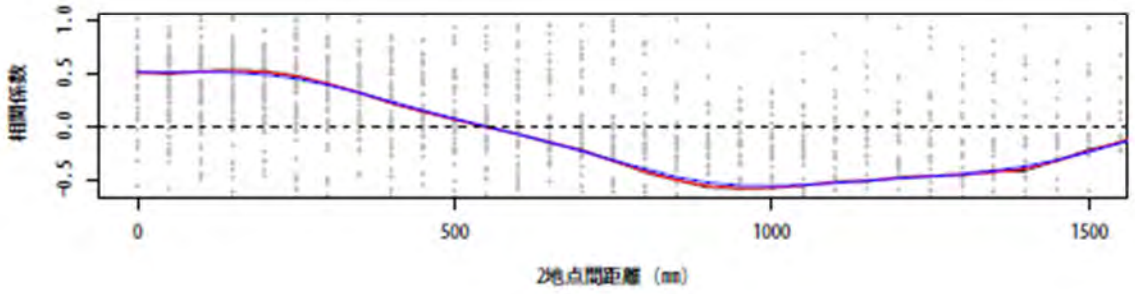
供試体 No.9



供試体 No.10

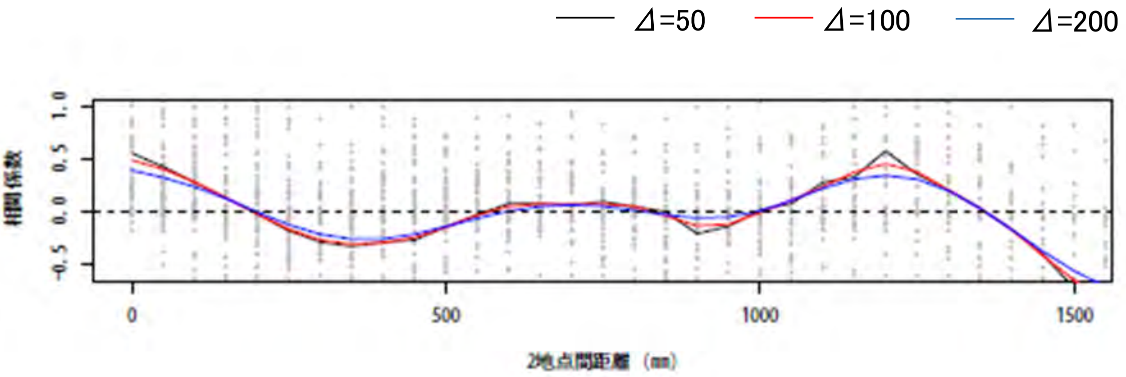


供試体 No.11

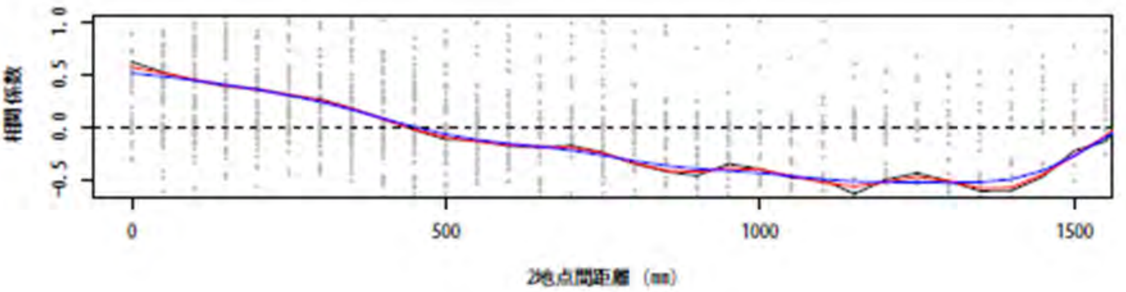


供試体 No.12

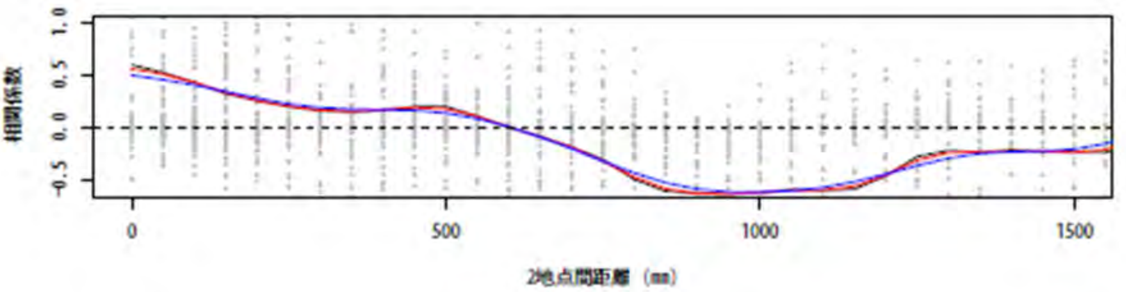
自己相関関数モデル未使用



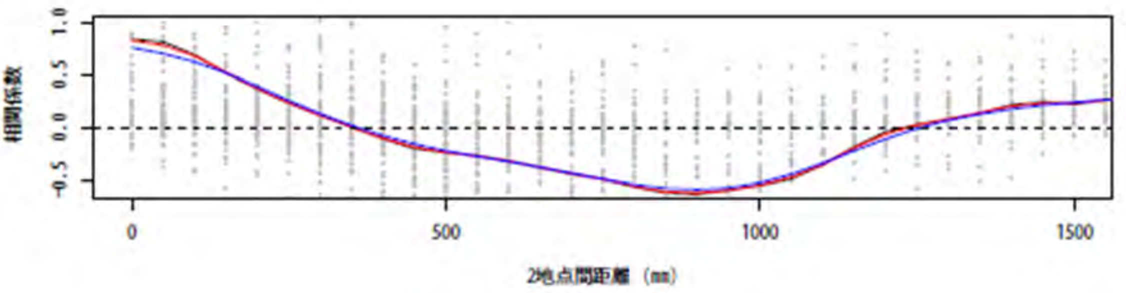
供試体 No.13



供試体 No.14

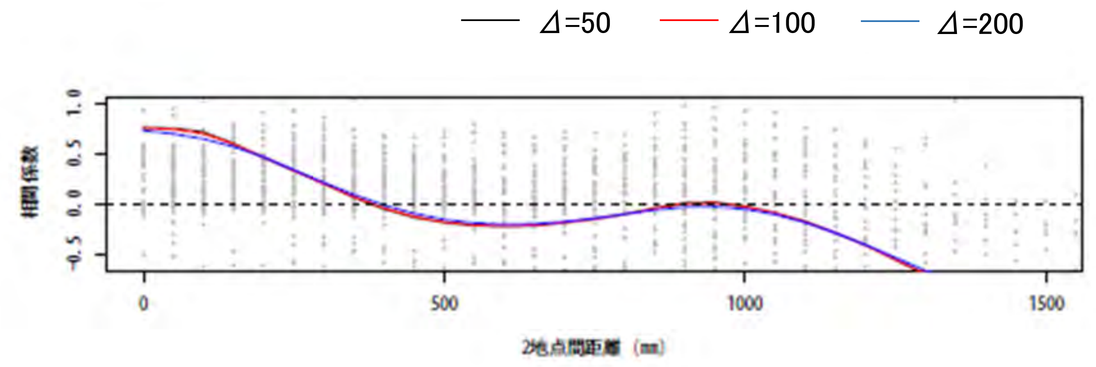


供試体 No.15

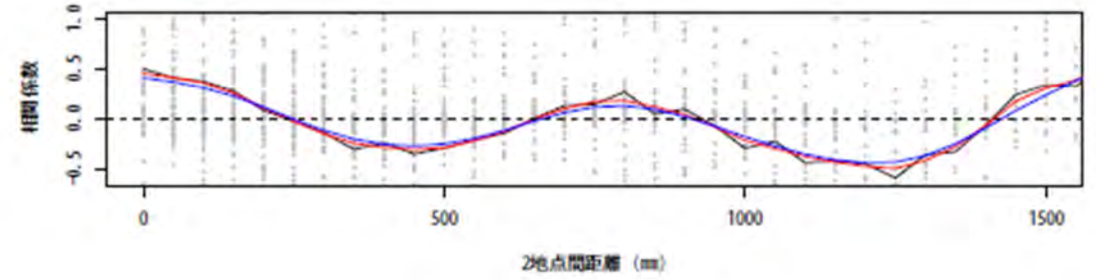


供試体 No.16

自己相関関数モデル未使用

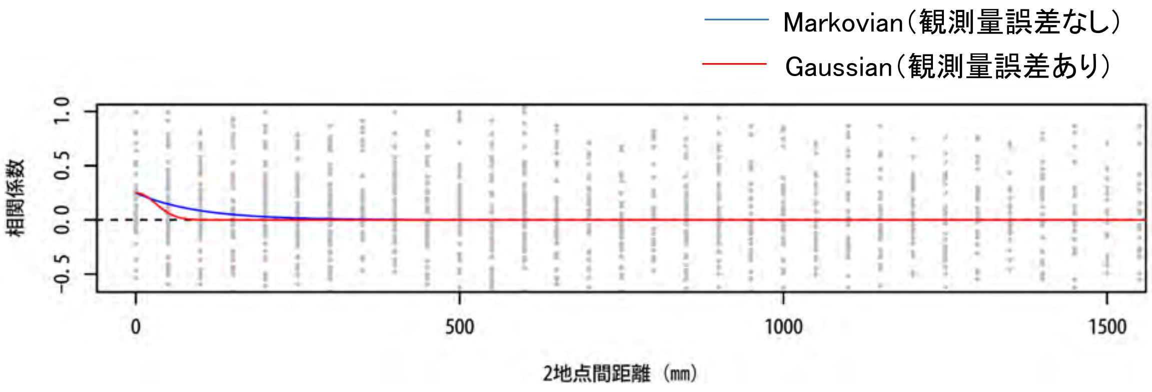


供試体 No.17

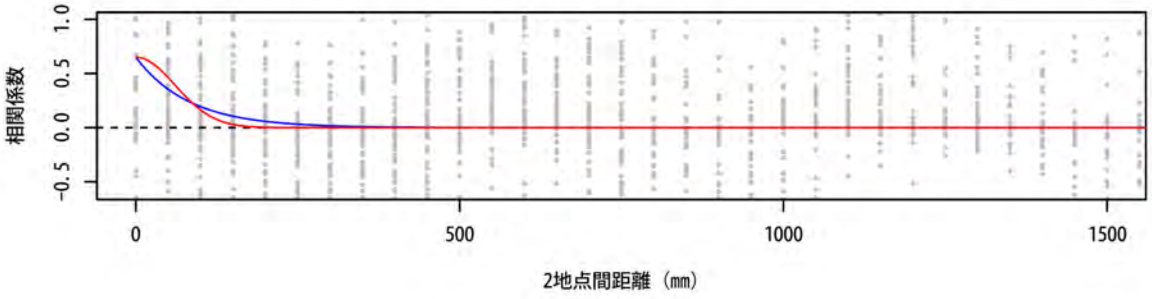


供試体 No.18

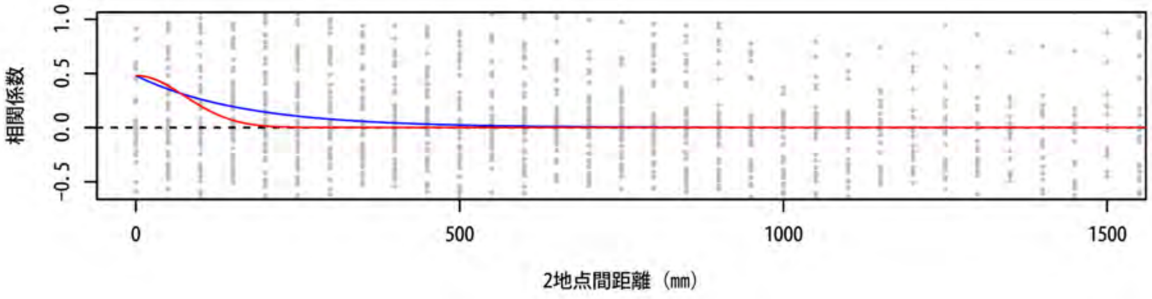
自己相関関数モデル未使用



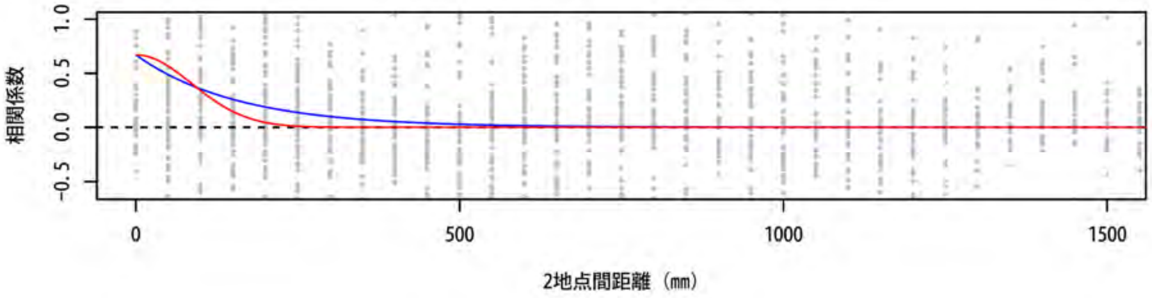
供試体 No.1



供試体 No.2

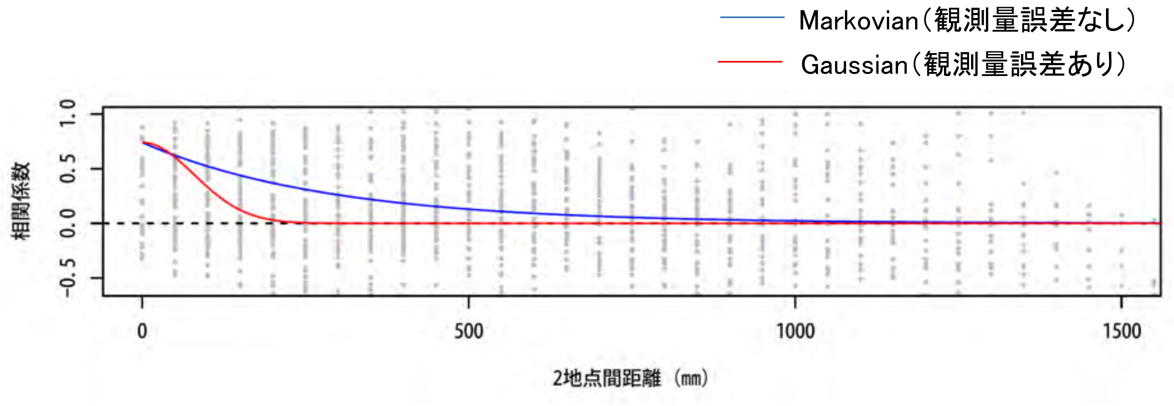


供試体 No.3

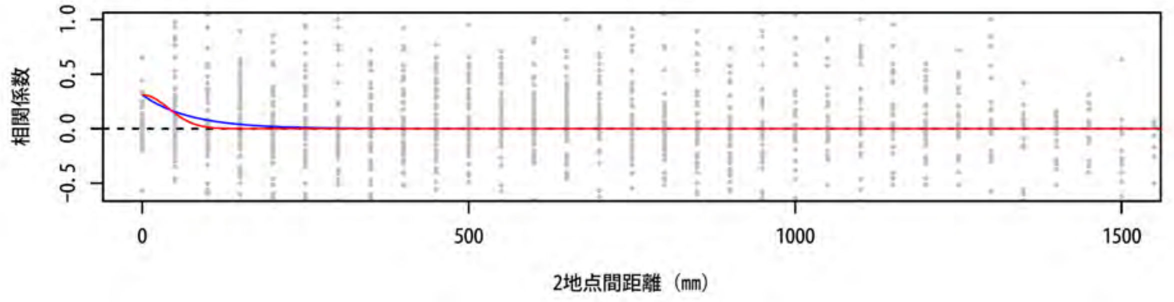


供試体 No.4

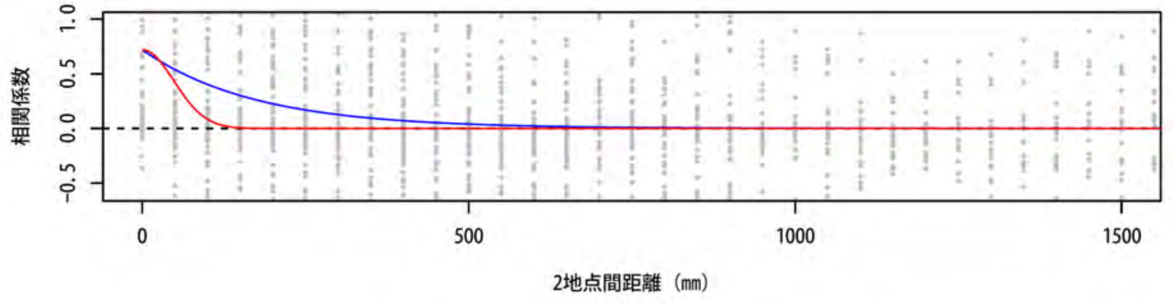
自己相関関数モデル使用



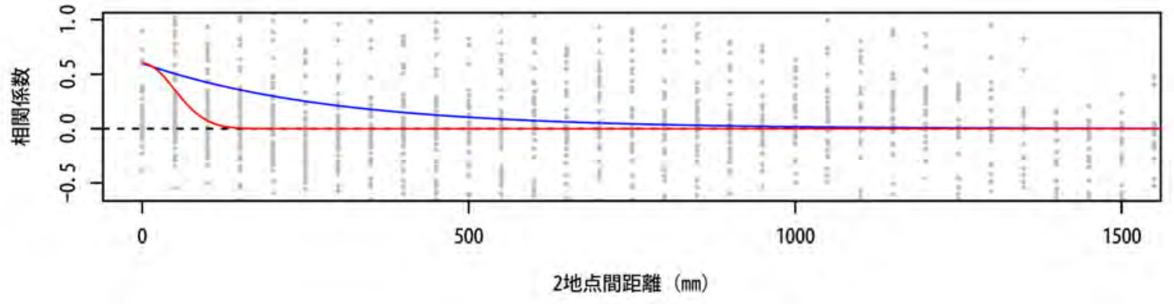
供試体 No.5



供試体 No.6

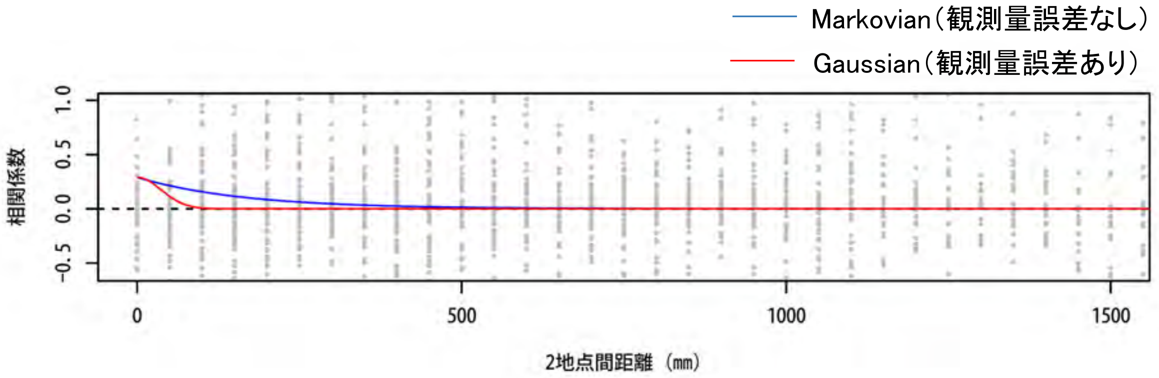


供試体 No.7

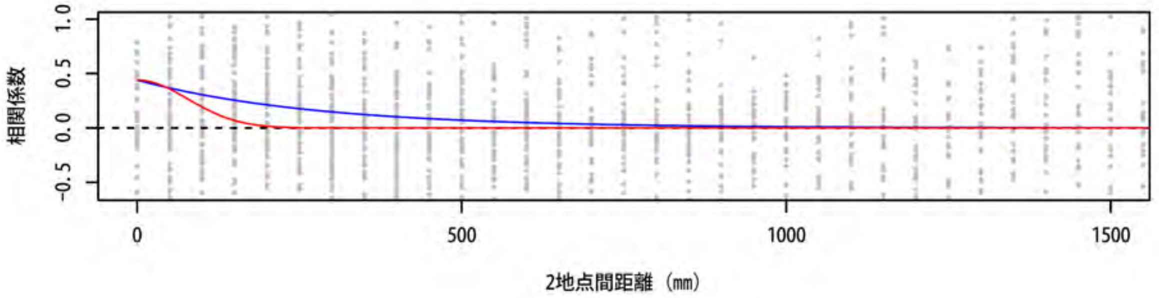


供試体 No.8

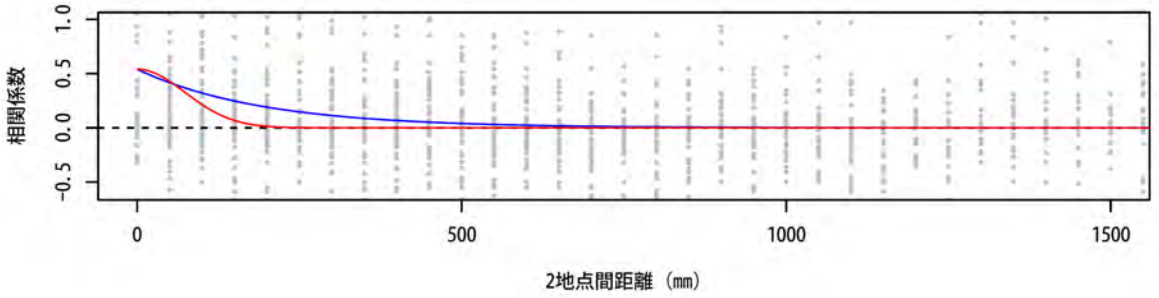
自己相関関数モデル使用



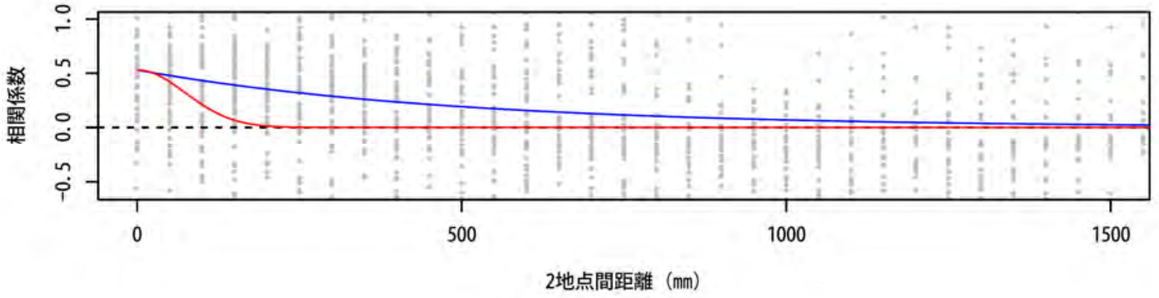
供試体 No.9



供試体 No.10

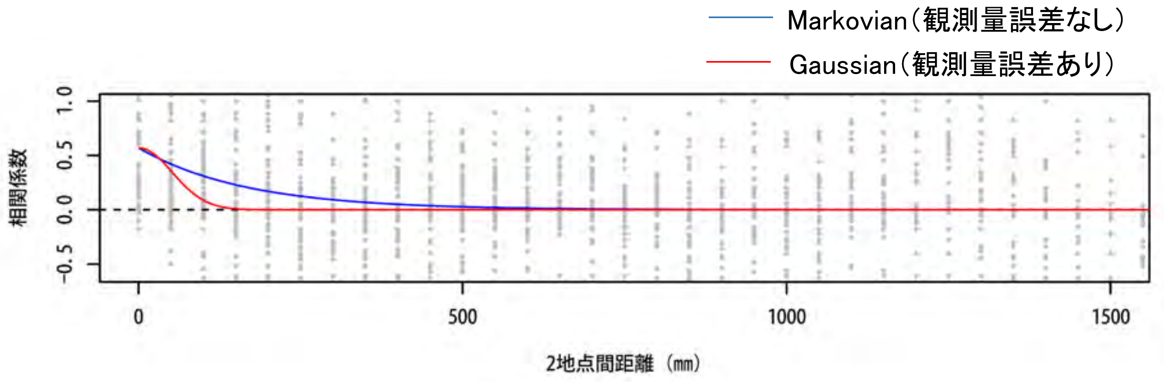


供試体 No.11

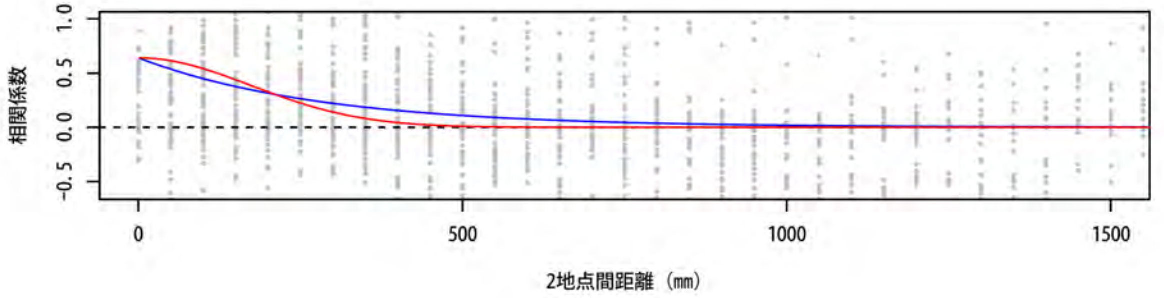


供試体 No.12

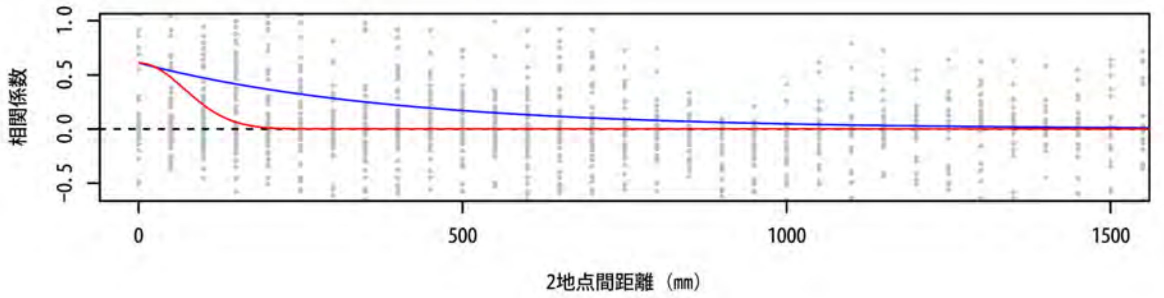
自己相関関数モデル使用



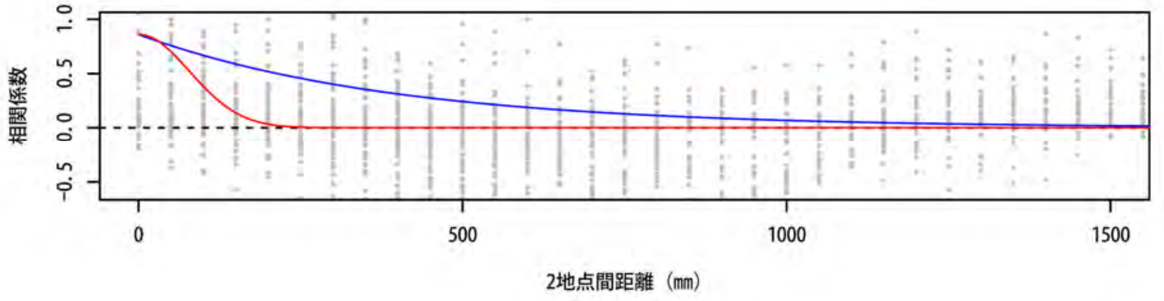
供試体 No.13



供試体 No.14

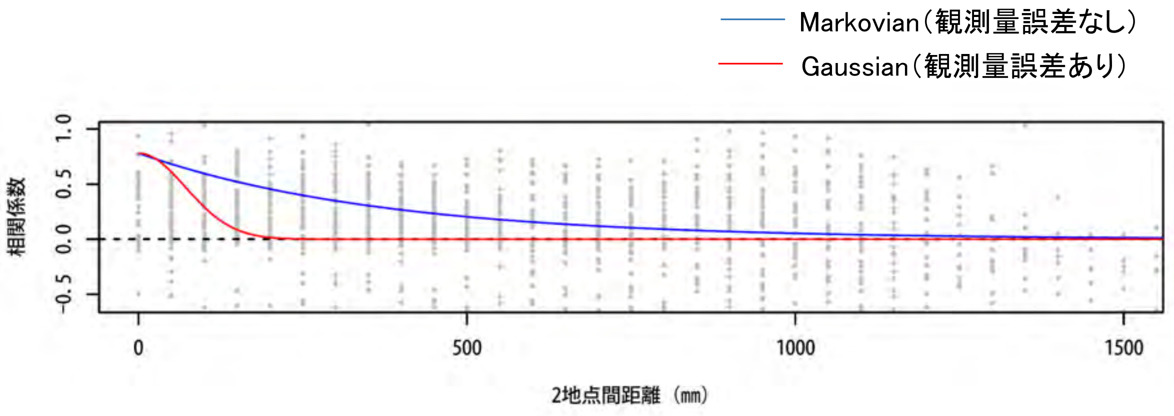


供試体 No.15

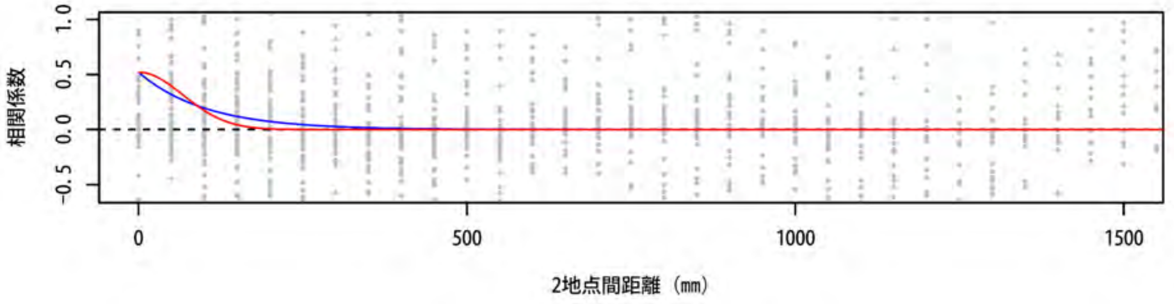


供試体 No.16

自己相関関数モデル使用



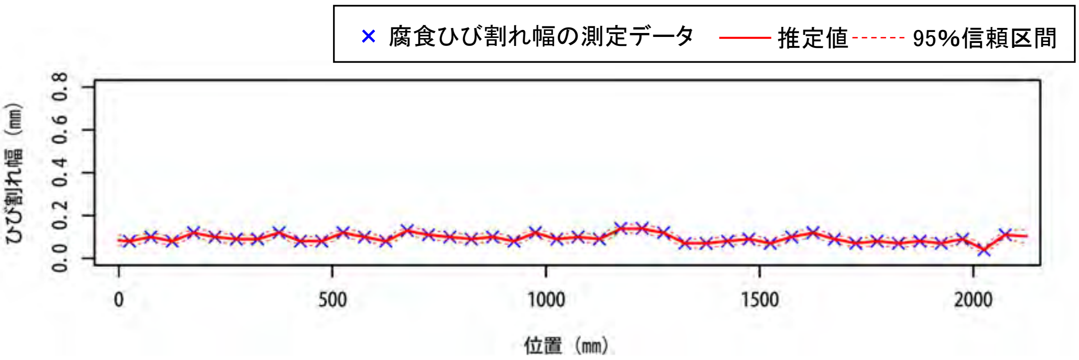
供試体 No.17



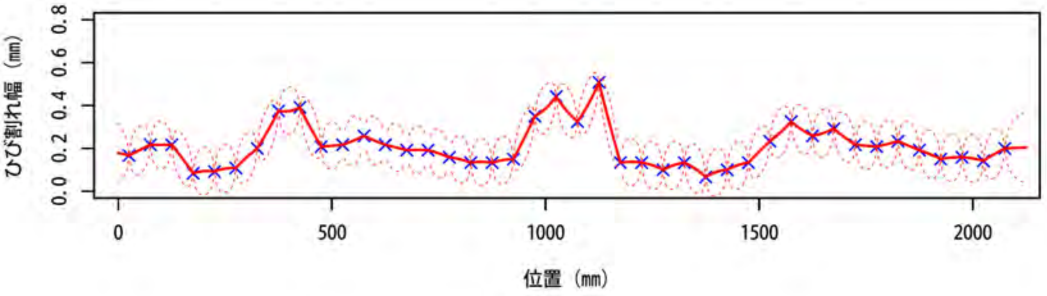
供試体 No.18

自己相関関数モデル使用

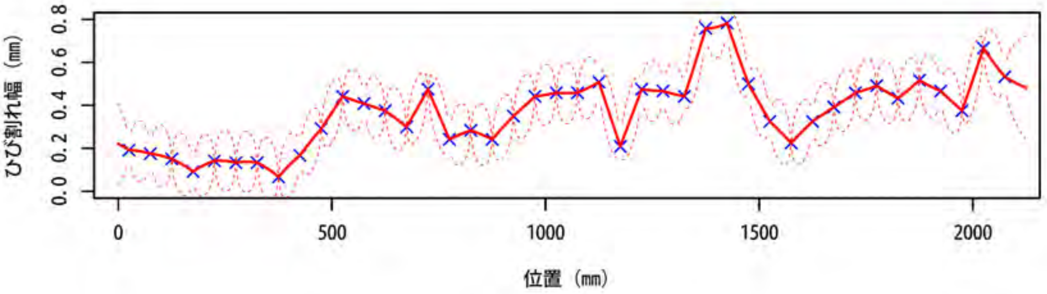
付録−Ⅱ　腐食ひび割れ幅の推定結果



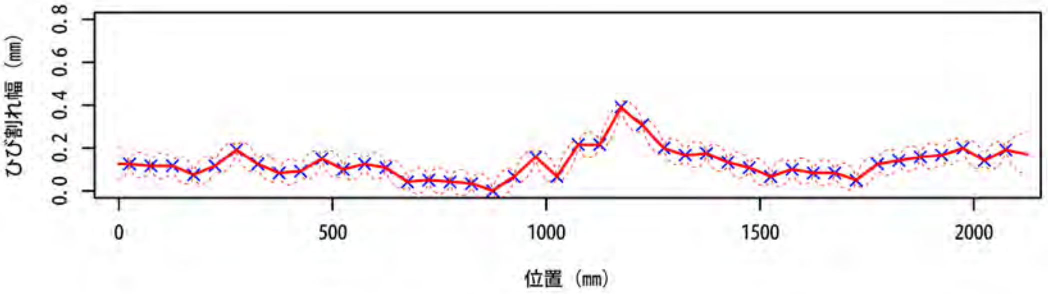
供試体 No.1



供試体 No.2

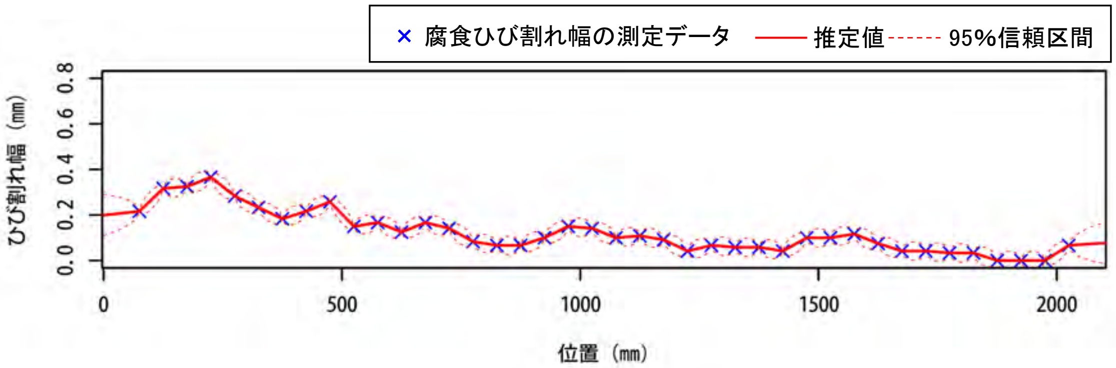


供試体 No.3

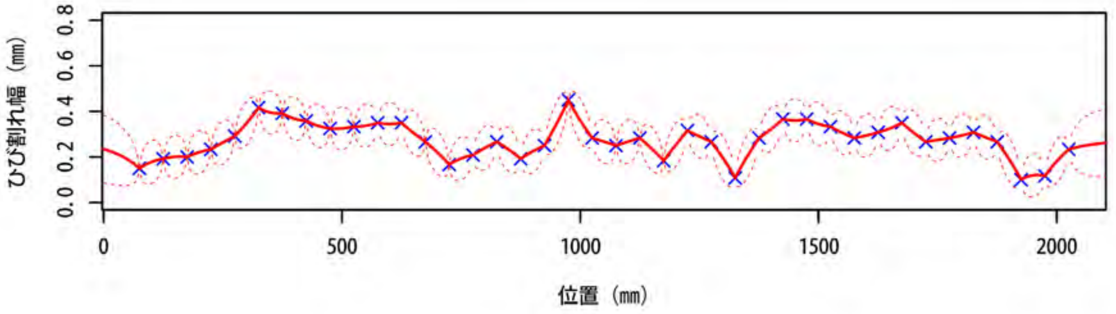


供試体 No.4

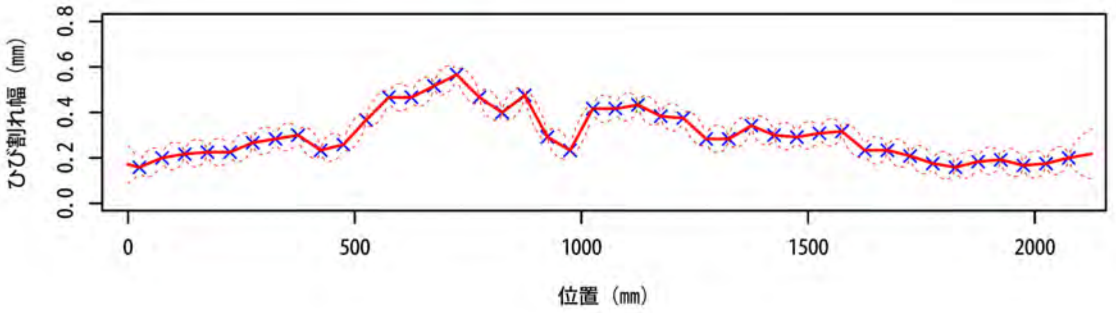
Markovian（観測量誤差なし）



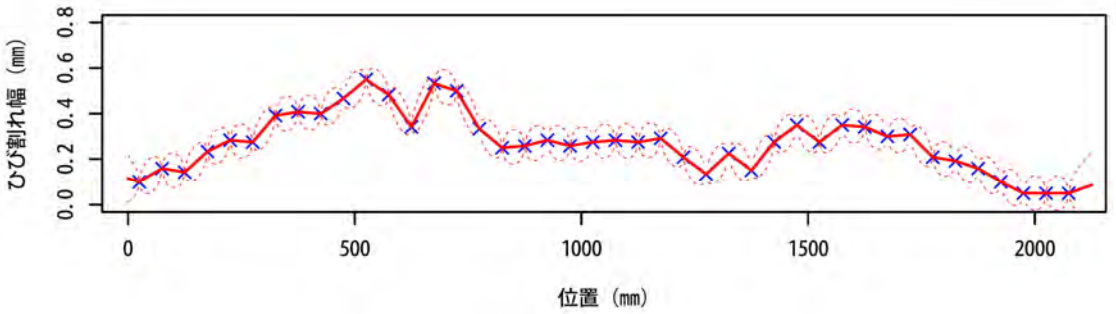
供試体 No.5



供試体 No.6

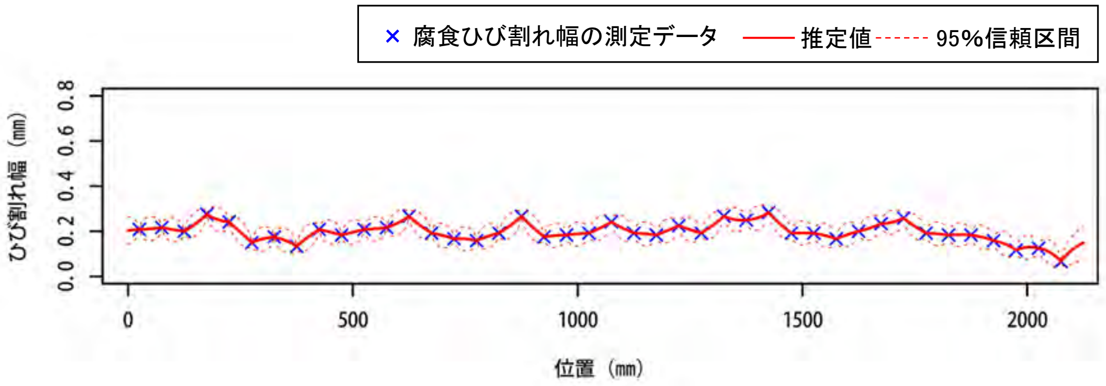


供試体 No.7

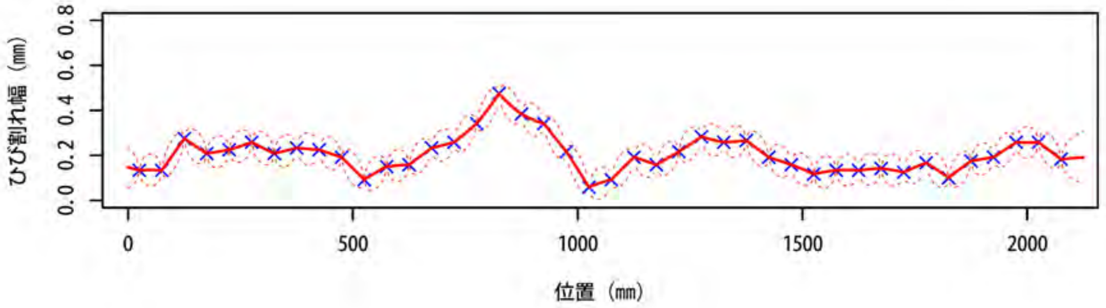


供試体 No.8

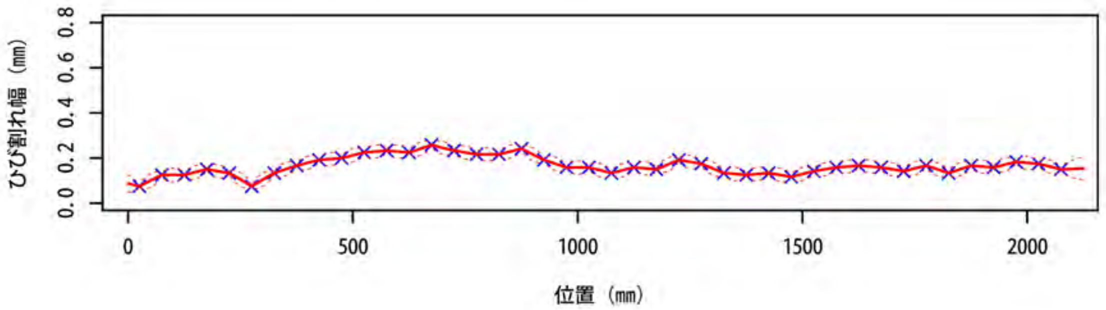
Markovian（観測量誤差なし）



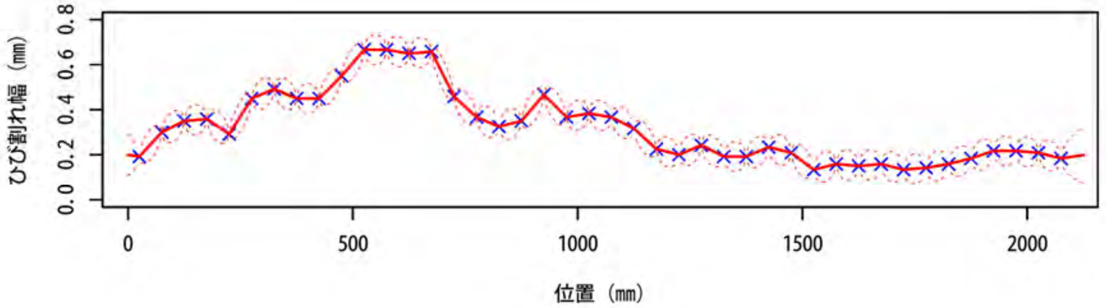
供試体 No.9



供試体 No.10

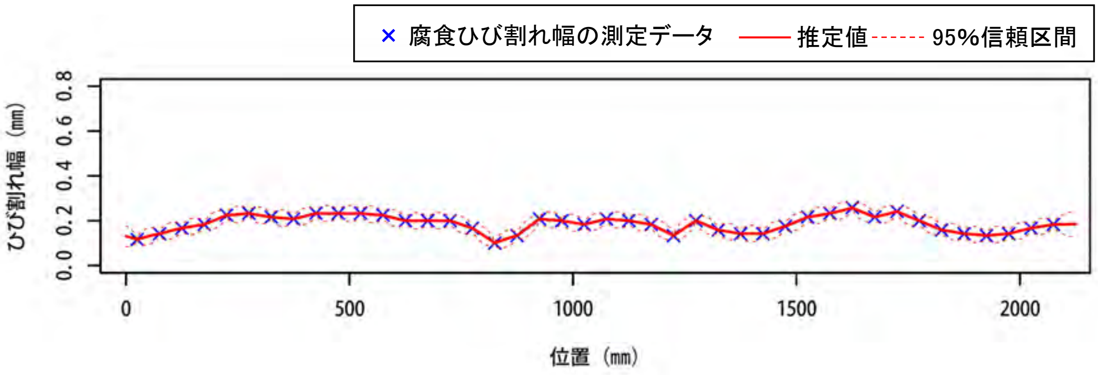


供試体 No.11

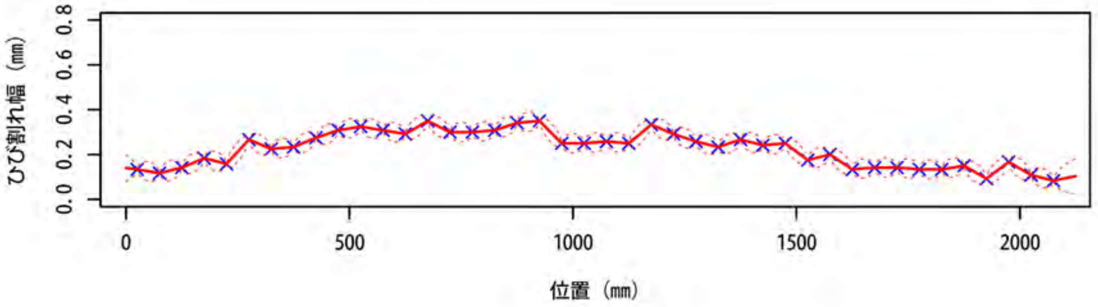


供試体 No.12

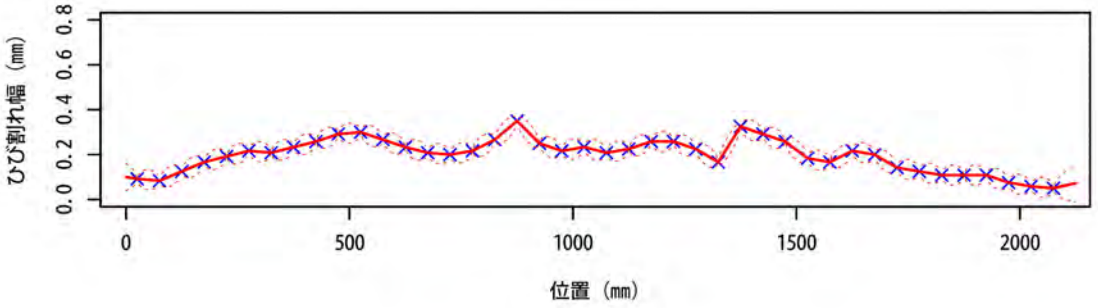
Markovian（観測量誤差なし）



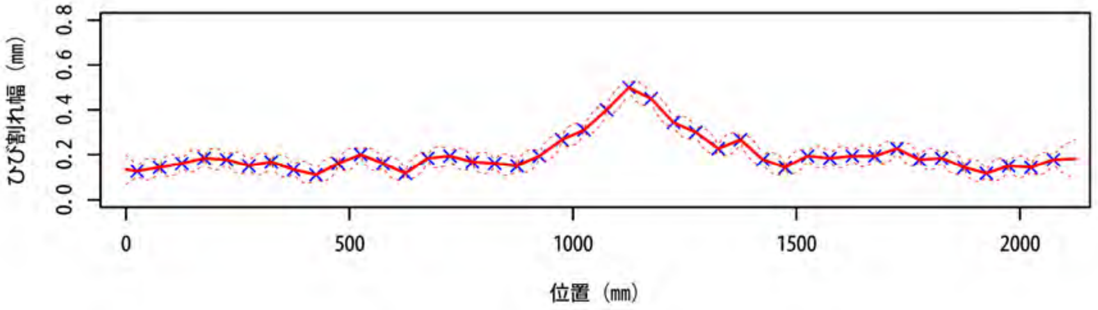
供試体 No.13



供試体 No.14

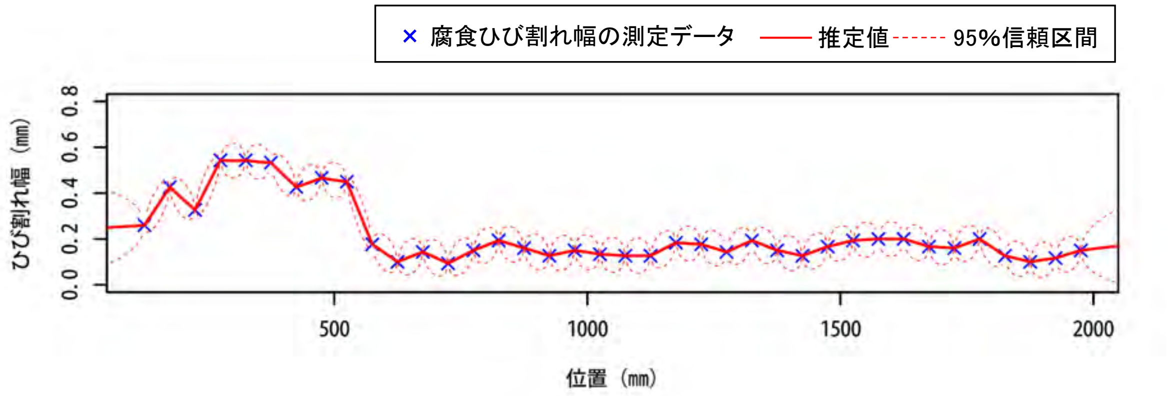


供試体 No.15

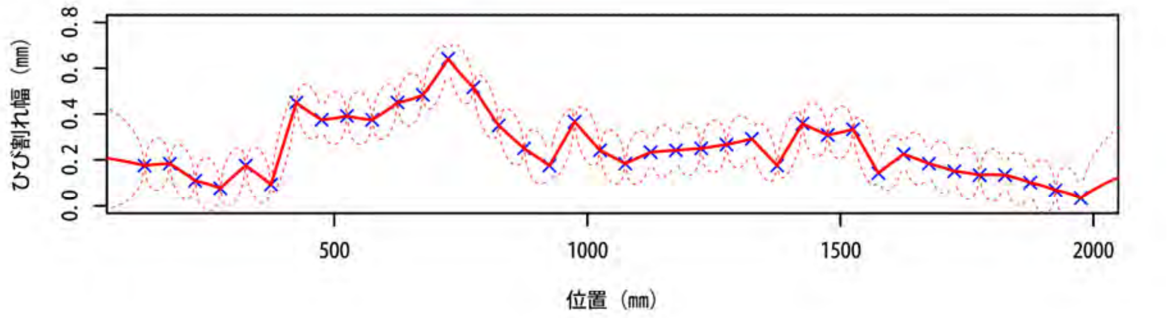


供試体 No.16

Markovian（観測量誤差なし）

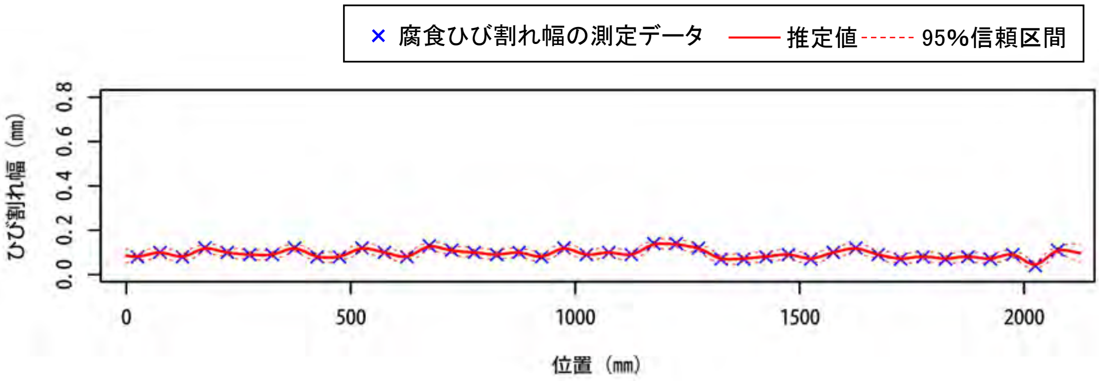


供試体 No.17

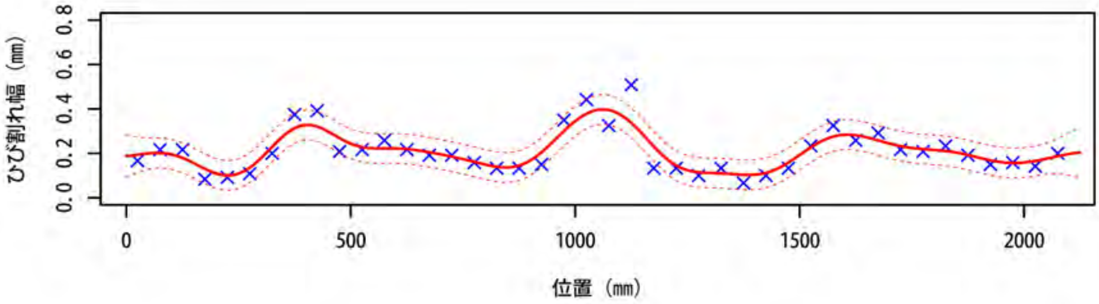


供試体 No.18

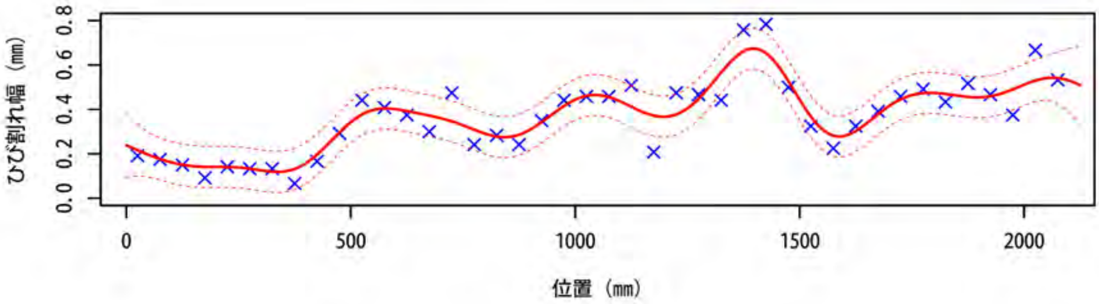
Markovian（観測量誤差なし）



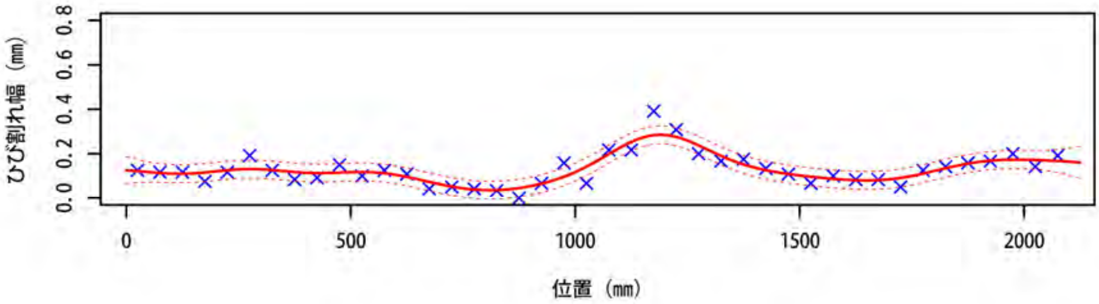
供試体 No.1



供試体 No.2

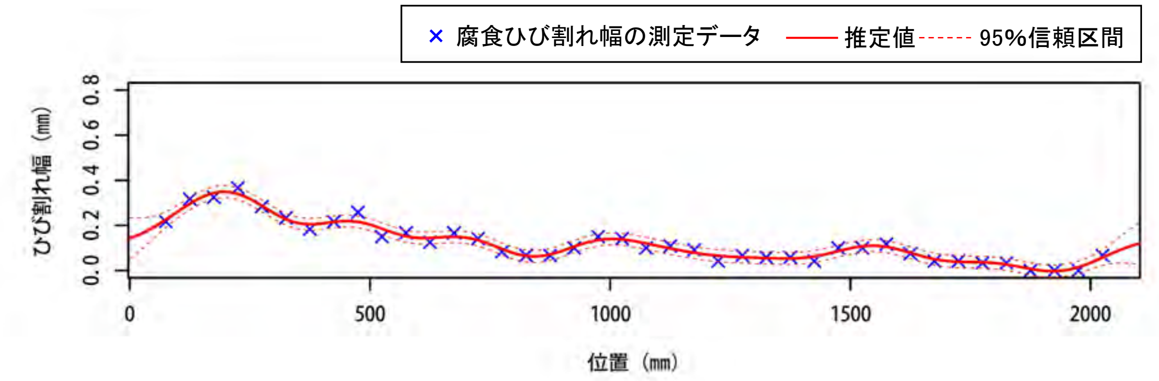


供試体 No.3

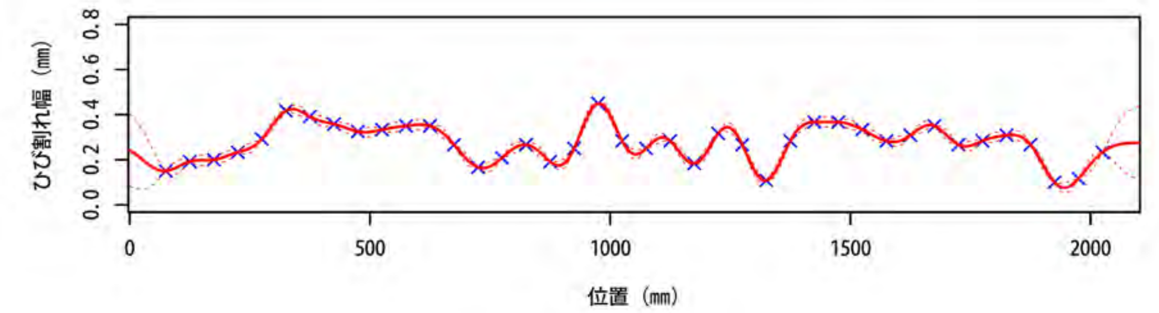


供試体 No.4

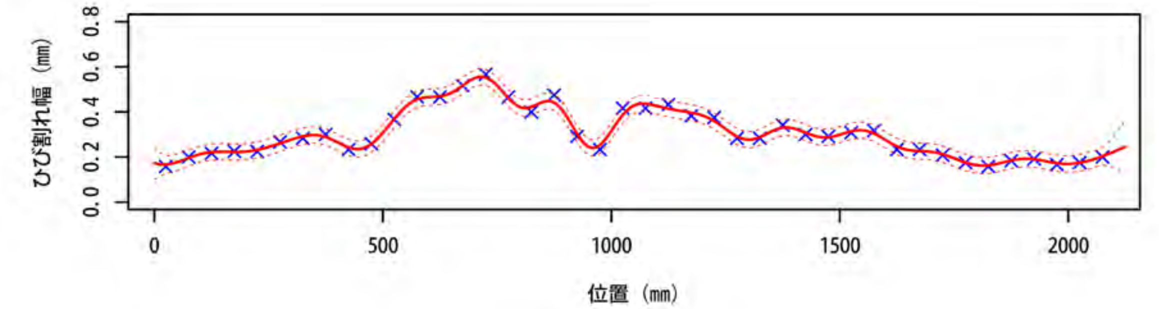
Gaussian（観測量誤差あり）



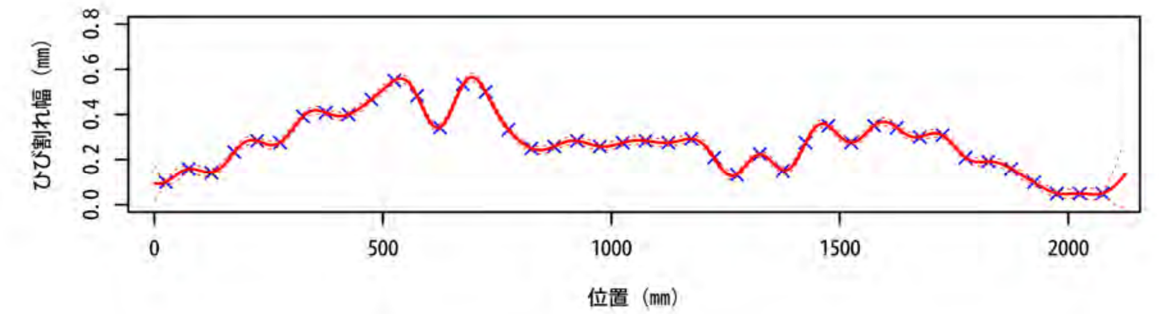
供試体 No.5



供試体 No.6

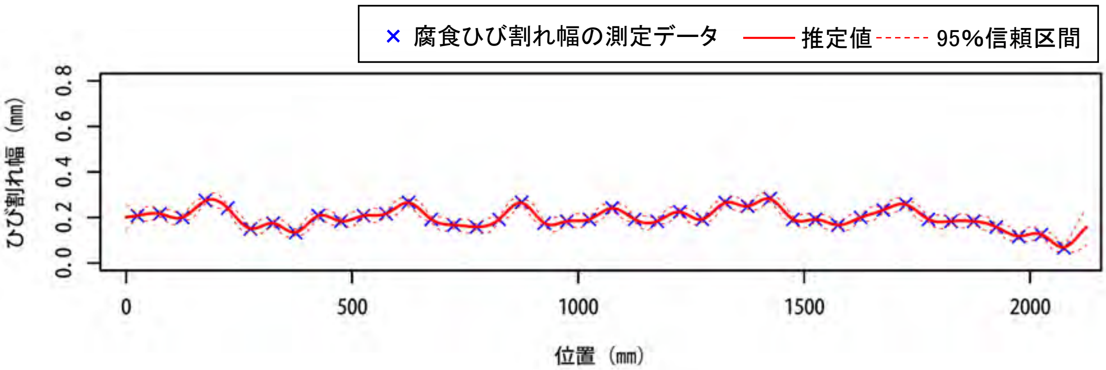


供試体 No.7

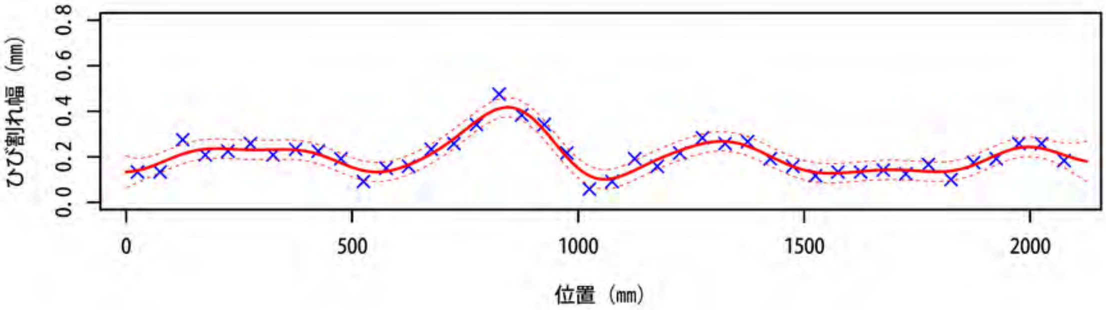


供試体 No.8

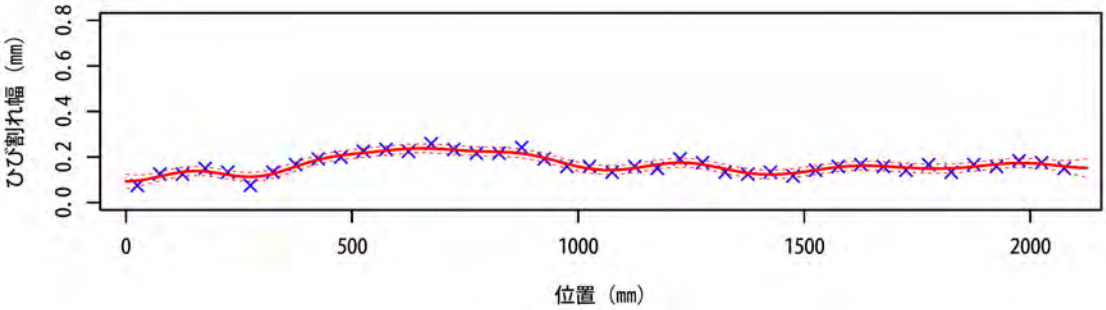
Gaussian（観測量誤差あり）



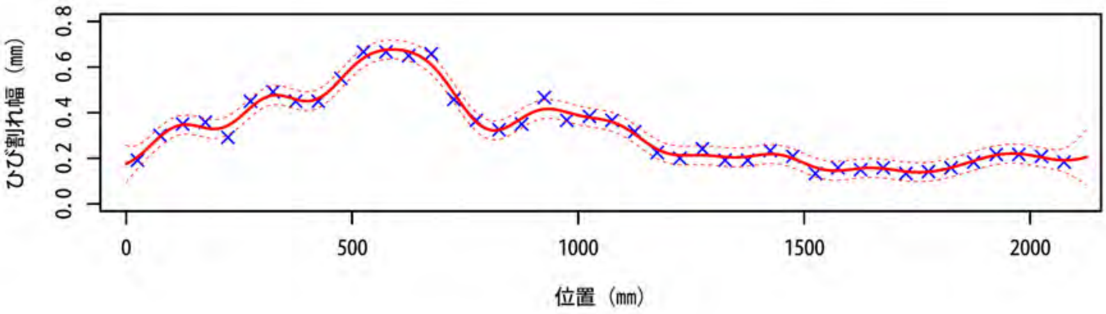
供試体 No.9



供試体 No.10

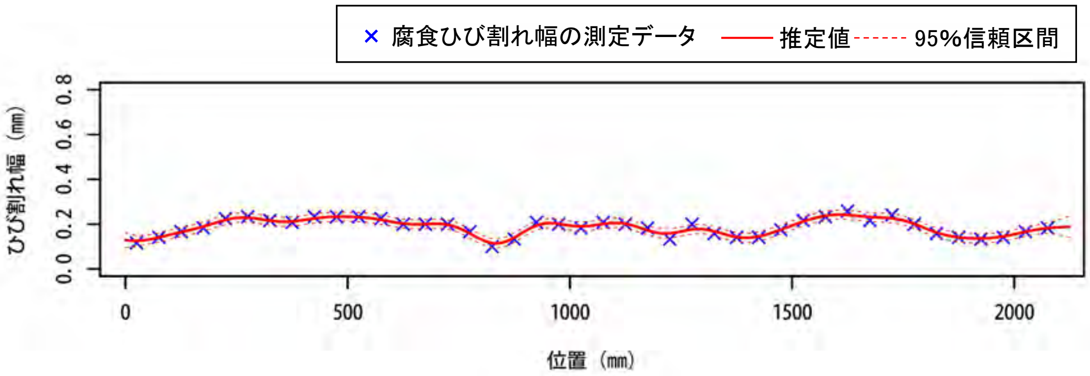


供試体 No.11

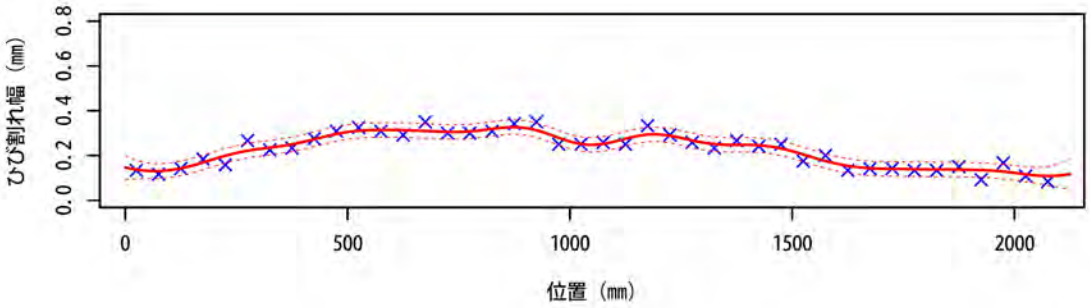


供試体 No.12

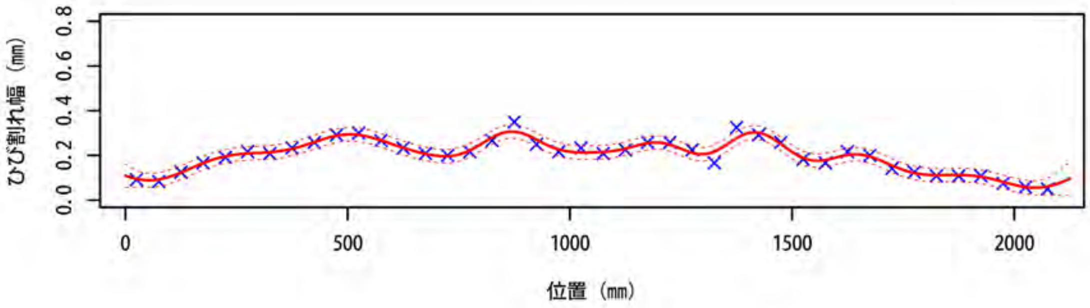
Gaussian（観測量誤差あり）



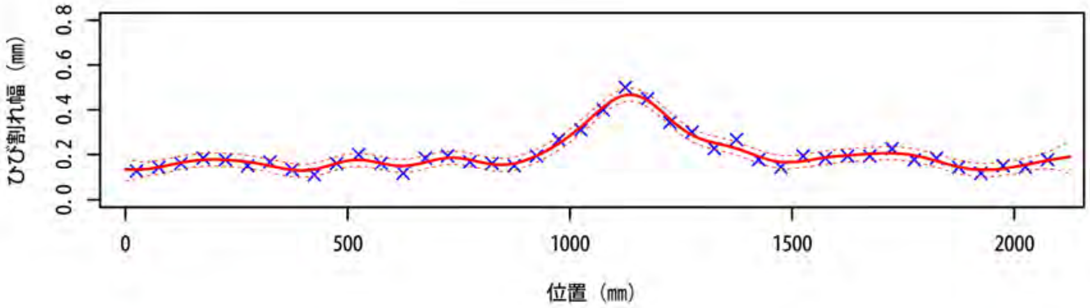
供試体 No.13



供試体 No.14

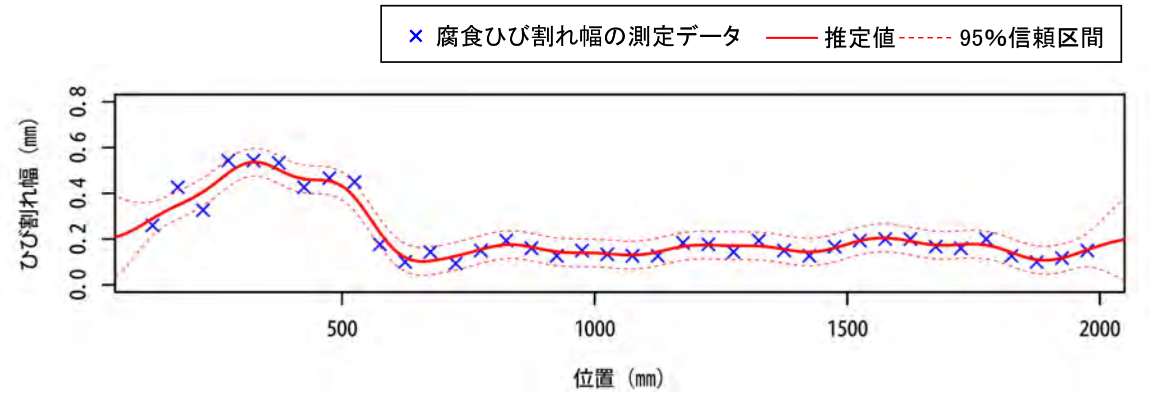


供試体 No.15

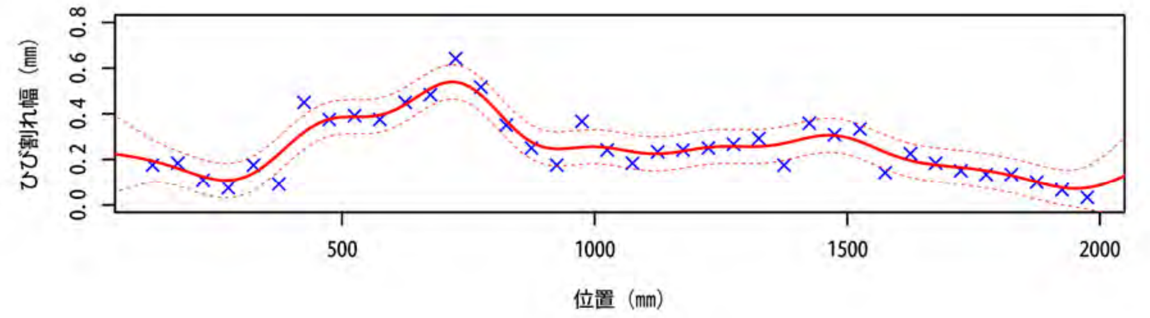


供試体 No.16

Gaussian（観測量誤差あり）



供試体 No.17



供試体 No.18

Gaussian（観測量誤差あり）

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの方からご指導，ご助言，励ましをいただきました．ここに厚く感謝致します．特に，指導教官および論文審査の主査を務めていただいた東京都市大学 吉田郁政教授，論文審査委員を務めていただいた同大学 丸山收教授，大鳥靖樹教授，栗原哲彦准教授には，最後まで本論文に関わっていただき心より御礼申し上げます．

タイプ的に研究者向きではない私が，こうして博士課程をとおして研究を行い，何とか博士論文の形に纏めることができたのは，奇跡に近いと感じています．ひとえに，本研究の遂行にあたり，単なる指導および助言に留まらず，挫折してしまわないよういろいろと配慮をしていただいた吉田先生のおかげです．本当に心より厚くお礼申しあげます．

吉田先生との出会いは，今からおよそ 25 年前に遡ります．当時，吉田先生と私は東電設計株式会社というコンサルタント会社に在籍していました．ある日，他部署から移って来られて私の上司になられたのが吉田先生です．吉田先生が上司になると，それまで図面作成，数量計算および設計計算しか経験のなかった私の業務は一変し，研究色の強い業務にも関わることになりました．

吉田先生と初めての仕事をしたときのことです．報告書を作成し，吉田先生に確認してもらったところ，私の書いた報告書の文章は，赤いボールペンによる訂正指示だらけで真っ赤になって戻ってきました．社会人になって 10 年以上が過ぎ，設計者としてそれなりに成長したと感じていた私にとって，自分のキャリアが全否定されたようで，かなりショックを受けました．当時の私は自分の視点からしか考えられなかったのですが，今思えば，吉田先生も私と同様に，使えない部下を持たされたと，相当，ショックを受けたことと思います．今となっては，吉田先生と私を繋ぐ良き想い出になっています．

もう一つの印象的な想い出が，当時，初めて触れることになったプログラム言語に関するものです．現在は，Fortran，C，Visual BASIC，Python および R 言語など土木の世界でも様々なプログラム言語が使われていますが，当時は技術計算と言えば Fortran でした．吉田先生と一緒に仕事をするまで，市販のプログラムしか利用したことがなく，自分でプログラムを書くことなど考えたことがありませんでした．ところが吉田先生は，業務の内容によっては 1 からプログラムを書き，作成したプログラムを駆使して業務を遂行します．部下にもちょっとした既往のプログラムの修正程度は出来るようになることを求めました．私にとって，30 も半ば過ぎからの Fortran の手習いで

す．ある日，吉田先生からプログラム作成の指示がありました．不慣れな私は上手くプログラムを書くことが出来ず，結局，指示を受けてから出来上がるまで1ヶ月を要してしまいました．今思えば，簡単なプログラムで，慣れた人なら2日もあれば出来てしまうものでした．それでも，自分がプログラムを完成させるまで吉田先生はじっと我慢してくれました．そういう吉田先生の辛抱強さのおかげで本博士論文は完成できたと感じています．

吉田先生は，その後，東電設計を辞められて，東京都市大学（当時は武蔵工業大学）に移られました．それ以降15年以上経つのですが，上述のような使えない部下でも，ずっと懇意にしていただいています．本研究は，そんな吉田先生から博士コースで，今まで培ってきた技術者としての知識を生かせるような研究をしてみないか，との誘いがきっかけでした．そんな甘い誘惑に誘われて，もしかしたら自分も博士論文が書けるかもしれないという妄想を抱いてはじめた研究です．途中，業務が忙しくて中断したこともありましたが，何とかここまで来ました．

本博士論文は，吉田先生だけでなく吉田研究室の学生にもいろいろと協力してもらった結果，何とか完成させることが出来た成果です．吉田研究室から社会人として旅立った益子諒氏，喜多村光氏，加藤凱氏，長谷川誠氏および黒木亮磨氏の皆様，ありがとうございました．また，現在，研究室に在籍する富澤幸久氏，中村朋佳氏には，いろいろと教えてもらうことも多く，大変お世話になりました．博士論文の研究をしている期間，吉田研究室のゼミ合宿にも何回か参加しました．吉田研究室はいつも和気あいあいとした雰囲気があり，ゼミ合宿の参加も楽しい想い出です．オーストリアで行われた海外発表も想い出に残る経験でした．吉田ご夫妻と，当時，吉田研のリーダーだった田崎陽介氏と行動を共にしました．オーストリア滞在中を楽しく過ごすことができたのは，一緒にいる時間が長かった田崎氏の心遣いのおかげだと思います．ありがとうございました．

本博士論文では，中央大学都市環境学科の大下英吉教授らが実施したRC構造物の残存耐力の研究で測定した実験データを使わせていただきました．快く実験データの使用を承認していただき，厚くお礼申し上げます．

最後になりましたが，何年もの間，研究を継続することができたのは，家族の協力あればこそです．妻美由起並びに息子裕也には迷惑をかけましたが，やっと完成することができました．心から感謝します．